



**INSTITUT FÜR
ENERGIETECHNIK
UND THERMODYNAMIK**
Institute of Energy Systems and Thermodynamics

Diplomarbeit

Entwicklung einer automatischen Verstelleinrichtung zur Sondenkalibrierung

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Reinhard Willinger

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Gregor Franz Nicht, BSc

E302 – Institut für Energietechnik und Thermodynamik

Eingereicht an der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

der Technischen Universität Wien

zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

von

Daniel Vejnosa, BSc

Matr.Nr. 01425819

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich diese Diplomarbeit bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin / einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, Mai 2023



Daniel Vejnaska, BSc

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Prof. Willinger für die Möglichkeit bedanken, diese Diplomarbeit an seinem Institut verfassen zu dürfen. Er war stets ein guter Ansprechpartner, wenn ich Fragen hatte und hat teils viele Stunden mit mir im Labor verbracht, um alle nötigen Messungen abzuschließen.

Ein großer Dank geht auch an die interne Werkstatt des Instituts für Energietechnik und Thermodynamik, die den Großteil der mechanischen Bauteile für diese Diplomarbeit gefertigt haben.

Außerdem möchte ich meiner Familie, vor allem meinen Eltern Sabine und Norbert Vejnaska, danken, welche mich über die gesamte Dauer meines Studiums stets unterstützt haben. Ohne diese Unterstützung wäre es deutlich schwerer gewesen das Studium erfolgreich abzuschließen.

Zu guter Letzt möchte ich meinem Mannschaftskollegen und Freund Martin Skalicky danken, welcher mir mit seinem 3D-Drucker bei der Fertigung behilflich war.

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit behandelt die Entwicklung einer automatischen Verstelleinrichtung zur Kalibrierung von pneumatischen Strömungssonden, in diesem Fall Strömungsvektorsonden in der Form von Drei- und Fünflochsonden. Strömungsvektorsonden dienen zur Ermittlung der Geschwindigkeit von stationären Strömungen und deren Richtung in der Ebene (Dreilochsonde) bzw. im Raum (Fünflochsonde). Die Geschwindigkeit und Richtung der Strömung wird indirekt über eine Druckmessung an den Bohrungen der Strömungsvektorsonde gemessen. Um diese gemessenen Drücke richtig der Geschwindigkeit und Richtung der Strömung zuzuordnen, ist eine Kalibrierung der Strömungsvektorsonde nötig. Diese Kalibrierung erfolgt für einen vorher definierten Winkelbereich, unter Laborbedingungen, vor einem Freistrahwindkanal am Institut für Energietechnik und Thermodynamik an der Technischen Universität Wien. Aus den gemessenen Drücken können dimensionslose Kalibrierkoeffizienten, in diesem Fall werden die Kalibrierkoeffizienten nach Treaster und Yocum [1] verwendet, berechnet werden, welche die gemessenen Drücke eindeutig der Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsrichtung zuordnen.

Die bisherige Winkeleinstellung der Strömungsvektorsonden am Institut für Energietechnik und Thermodynamik erfolgte über eine händisch verstellbare Vorrichtung. In dieser Diplomarbeit wird die Entwicklung einer automatischen Verstelleinrichtung gezeigt. Für die Winkeleinstellung werden zwei Schrittmotoren verwendet, wodurch, in Verbindung mit einer Stirnradstufe, der Gier- und Nickwinkel der Strömungssonde in $0,1^\circ$ Schritten mit einer Genauigkeit von $\pm 0,02^\circ$ einstellbar ist. Durch die Verbindung mit einem Arduino Uno Mikrocontroller, können die Schrittmotoren über die Software LabVIEW 2016 angesteuert werden. Es wird gezeigt, wie ein parametrisiertes LabVIEW Programm aussieht, durch welches alle nötigen Kalibrierpunkte eingestellt werden und das bereits vorhandene Druckmessprogramm als Unterprogramm für jeden Kalibrierpunkt aufgerufen wird.

Anschließend wird die gefertigte Verstelleinrichtung in der Praxis angewandt und anhand der Kalibrierung einer Dreilochsonde und einer Fünflochsonde bei verschiedenen Reynoldszahlen die erreichten Vorteile aufgezeigt. Die Ergebnisse werden mit alten Kalibrierdaten, welche unter denselben Bedingungen gemessen wurden, und den Ergebnissen aus einem theoretischen Berechnungsverfahren der Kalibrierkoeffizienten, dem Stromlinienprojektionsverfahren, verglichen.

Abstract

This diploma thesis deals with the development of an automatic adjustment device for the calibration of pneumatic flow probes, in this case flow vector probes in the form of three- and five-hole probes. Flow vector probes are used to determine the velocity of steady-state flows and their direction in the plane (three-hole probe) or in space (five-hole probe). The velocity and direction of the flow is measured indirectly via a pressure measurement at the holes of the flow vector probe. To correctly assign these measured pressures to the velocity and direction of the flow, a calibration of the flow vector probe is necessary. This calibration is performed for a previously defined angular range, under laboratory conditions, in front of a free jet wind tunnel at the Institute of Energy Systems and Thermodynamics at the Vienna University of Technology. Dimensionless calibration coefficients, in this case the calibration coefficients according to Treaster and Yocum [1], can be calculated from the measured pressures, which clearly assign the measured pressures to the flow velocity and flow direction.

The previous angular adjustment of the flow vector probes at the Institute of Energy Systems and Thermodynamics was done by a manually adjustable device. In this diploma thesis the development of an automatic adjustment device is shown. Two stepper motors are used for the angle adjustment, whereby, in connection with a spur gear stage, the yaw and pitch angle of the flow probe is adjustable in steps of $0,1^\circ$ with an accuracy of $\pm 0,02^\circ$. By connecting to an Arduino Uno microcontroller, the stepper motors can be controlled using LabVIEW 2016 software. It is shown how a parameterized LabVIEW program looks like, through which all necessary calibration points are set and the already existing pressure measurement program is called as a subroutine for each calibration point.

Subsequently, the manufactured adjustment device is applied in practice and the advantages achieved are demonstrated by calibrating a three-hole probe and a five-hole probe at different Reynolds numbers. The results are compared with old calibration data, which were measured under the same conditions, and the results from a theoretical calculation method of the calibration coefficients, the streamline projection method.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Aufgabenstellung	1
2. Pneumatische Strömungssonden	2
2.1. Dreilochsonden	3
2.2. Fünflochsonden.....	5
3. Strömungsmechanische Grundlagen	7
3.1. Massenerhaltung.....	7
3.2. Bernoulli-Gleichung	8
3.3. Dimensionslose Kennzahlen	9
3.3.1. Reynoldszahl.....	9
3.3.2. Machzahl.....	9
3.4. Zusätzliche Gleichungen	10
3.4.1. Kinematische Viskosität	10
3.4.2. Dichte der Luft.....	10
3.4.3. Schallgeschwindigkeit	10
4. Kalibrierung pneumatischer Strömungssonden	12
4.1. Bohrungskoeffizienten.....	13
4.2. Kalibrierkoeffizienten nach Treaster und Yocum	13
4.3. Methode der Stromlinienprojektion.....	15
4.3.1. Bohrungskoeffizienten.....	15
4.3.2. Kalibrierkoeffizienten	15
4.4. Ablauf der Kalibrierung.....	16

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4.5.	Einflussfaktoren auf die Kalibrierung pneumatischer Strömungssonden..	18
4.5.1.	Einfluss der Reynoldszahl	18
4.5.2.	Einfluss des Turbulenzgrades	19
4.5.3.	Einfluss des Geschwindigkeitsgradienten	20
4.5.4.	Effekte durch Wandnähe	20
5.	Versuchsumgebung	22
6.	Planung und Konstruktion der Verstelleinrichtung	25
6.1.	Elektrische Komponenten	26
6.2.	Mechanische Komponenten	33
6.2.1.	Verstelleinrichtung für den Gierwinkel	34
6.2.2.	Verstelleinrichtung für den Nickwinkel	36
6.2.3.	Profilvorrichtung	38
7.	Integration der Steuerung in LabVIEW	40
7.1.	LabVIEW Programm für die Sondenverstellung	40
7.2.	LabVIEW Programm für die Kalibrierung von Dreilochsonden	44
7.3.	LabVIEW Programm für die Kalibrierung von Fünflochsonden	47
7.4.	Ablauf der Kalibrierung einer pneumatischen Strömungssonde	50
8.	Auswertung der Messergebnisse	52
8.1.	Kalibrierung der SVUSS/3 Kobrasonde	53
8.2.	Kalibrierung der SVUSS/5 Kegelsonde	58
9.	Zusammenfassung und Ausblick	68
	Literaturverzeichnis	XI
	Abbildungsverzeichnis	XIV

Tabellenverzeichnis	XVI
Anhang	XVII
A. Python Code.....	XVII
A.A. Dreilochsonde.....	XVII
A.B. Fünflochsonde	XXI
B. Datenblätter.....	XXIX
C. Zeichnungsableitungen	XXXVI

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Nomenklatur

Lateinische Formelzeichen

a	Abstand zwischen den seitlichen Sondenbohrungen	$[m]$
A	Fläche	$[m^2]$
d	charakteristische Länge	$[m]$
d_n	Austrittsdurchmesser der Düse	$[m]$
d_K	Durchmesser des Sondenkopfes	$[m]$
d_S	Durchmesser des Sondenschaftes	$[m]$
g	Erdbeschleunigung	$[m/s^2]$
\bar{k}	Mittelwert der Bohrungskoeffizienten	$[-]$
k_i	Bohrungskoeffizienten	$[-]$
k_s	statischer Druckkoeffizient	$[-]$
k_t	Totaldruckkoeffizient	$[-]$
k_β	Gierwinkelkoeffizient	$[-]$
k_γ	Nickwinkelkoeffizient	$[-]$
l	Länge der Strömungssonde	$[m]$
M_0	momentan vorhandene Masse	$[kg]$
\dot{m}	Massenstrom	$[kg/s]$
Ma	Machzahl	$[-]$
n	Motordrehzahl	$[U/min]$
p	Druck	$[Pa]$
\bar{p}	Mittelwert der Bohrungsdrücke	$[Pa]$
p_{dyn}	dynamischer Druck	$[Pa]$
p_i	Druck an der Bohrung i	$[Pa]$
p_t	Totaldruck	$[Pa]$
p_u	Umgebungsdruck	$[Pa]$
R	Gaskonstante	$[J/kgK]$
Re	Reynoldszahl	$[-]$
s	Stromfadenkoordinate	$[m]$

T	Temperatur	[K]
t	Zeit	[s]
v	spezifisches Volumen	[m ³ /kg]
\dot{V}	Volumenstrom	[m ³ /s]
w	Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
w_0	Schallgeschwindigkeit	[m/s]
x	Abstand zwischen Düse und Sondenkopf	[m]
z	geodätische Höhe	[m]

Griechische Formelzeichen

$\Delta\beta$	Gierwinkel	[°]
$\Delta\gamma$	Nickwinkel	[°]
δ	charakteristischer Flankenwinkel des Sondenkopfes	[°]
κ	Isentropenexponent	[–]
ν	kinematische Viskosität	[m ² /s]
ρ	Dichte	[kg/m ³]

Indizes

$(\cdot)_i$	Größe an der Bohrung i
$(\cdot)_t$	Totalgröße
$(\cdot)_u$	Umgebungszustand

Abkürzungsverzeichnis

AVA	Aerodynamische Versuchsanstalt Göttingen
GUI	Graphic User Interface
MW	Mittelwert
NI	National Instruments
STABW	Standardabweichung

US	United Sensors
VI	Virtual Instrument

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

1. Aufgabenstellung

Pneumatische Strömungssonden sind ein robustes und bewährtes Instrument zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten in Komponenten von thermischen Turbomaschinen. Die Geschwindigkeitsvektoren werden dabei indirekt über die Druckmessungen am Sondenkopf bestimmt. Bevor eine Messung durchgeführt werden kann, ist es notwendig, die pneumatischen Strömungssonden unter definierten Bedingungen zu kalibrieren. Diese Kalibrierung findet in der Regel in einem Freistrahwindkanal statt, in dem die Sonde einer Strömung mit konstanter Geschwindigkeit und niedrigem Turbulenzgrad ausgesetzt wird, während verschiedene Gier- und Nickwinkel eingestellt werden. Die Ergebnisse der Kalibrierung sind dimensionslose Drücke, auch als Kalibrierkoeffizienten bezeichnet, die als Grundlage für die anschließende Auswertung der Messungen verwendet werden.

Das Institut verfügt über einen Freistrahwindkanal mit einem Düsendurchmesser von 120 mm, der für die Durchführung der Sondenkalibrierung genutzt wird. Aktuell werden die verschiedenen Gier- und Nickwinkel manuell eingestellt, was den Kalibriervorgang sehr zeitaufwändig macht. Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll eine automatische Verstelleinrichtung entwickelt werden, die diesen Prozess automatisiert. Die Schwerpunkte der Arbeit liegen auf der Planung und Konstruktion des mechanischen Teils sowie der Integration in die Steuerung mittels LabVIEW. Die Ergebnisse der Diplomarbeit dienen als Grundlage für zukünftige Sondenkalibrierungen mit dem Ziel, Effizienz und Datenqualität zu verbessern.

2. Pneumatische Strömungssonden

Pneumatische Strömungssonden dienen dazu die Geschwindigkeit eines strömenden Fluids zu bestimmen. Durch Messung des Druckes im Staupunkt der Sonde, kann die Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden. Da nicht die Geschwindigkeit direkt gemessen wird, sondern der Druck, wird von einer indirekten Messmethode gesprochen. Die bekannteste pneumatische Strömungssonde ist das Pitot-Rohr, welches in Abbildung 2.1 zu sehen ist. Für geringe Machzahlen $Ma < 0,2$ kann die Strömung als inkompressibel betrachtet werden und die Strömungsgeschwindigkeit indirekt aus der Differenz des im Staudruck gemessenen Totaldruckes p_t und des statischen Druckes p_{stat} berechnet werden. Um genaue Ergebnisse zu erzielen, muss das Pitot-Rohr exakt in Strömungsrichtung ausgerichtet werden. [2]

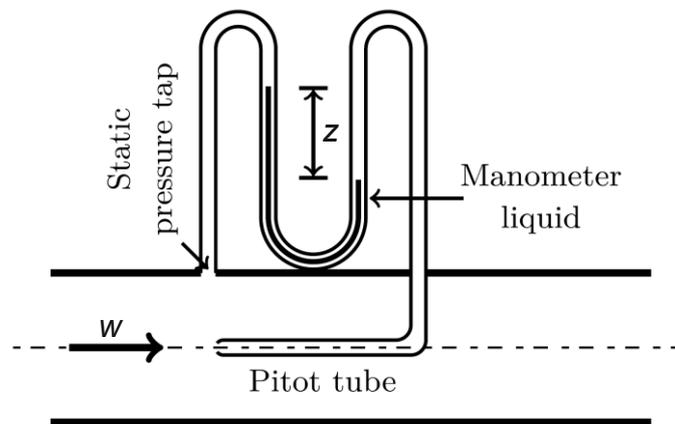


Abbildung 2.1: Prinzipdarstellung Pitot-Rohr

Mehr Informationen über die Strömung liefern sogenannte Strömungsvektorsonden bzw. Mehrlochsonden. Je nach Ausführung der Mehrlochsonde, ist es möglich, neben der Strömungsgeschwindigkeit, auch die Strömungsrichtung in der Ebene oder im Raum zu bestimmen. Verschiedene Ausführungen von Mehrlochsonden werden in Abbildung 2.2 gezeigt. Die Form der Sonde wird hier in Cobra-, Straight-, L-Shaped- und Drilled-Elbow-Sonden unterschieden. Es werden in Abbildung 2.2 Drei-, Fünf- und Siebenlochsonden gezeigt, wobei es auch Sonden mit bis zu 18 Löchern gibt [3]. Die Sonden können auch nach der Ausführung ihrer Kopfgeometrie in Trapez-, Zylinder-, Pyramiden-, Kegel- und Kugelsonden unterschieden werden. Mit Dreilochsonden ist es möglich die Richtung und den Betrag der Strömungsgeschwindigkeit in der Ebene zu bestimmen. Fünf- und Siebenlochsonden dienen zur Messung der Richtung und des Betrags der Strömungsgeschwindigkeit im Raum. Diese werden vor allem verwendet, um die Strömungsverhältnisse in Thermischen Turbomaschinen nach dem Schaufelgitter zu messen. [2]

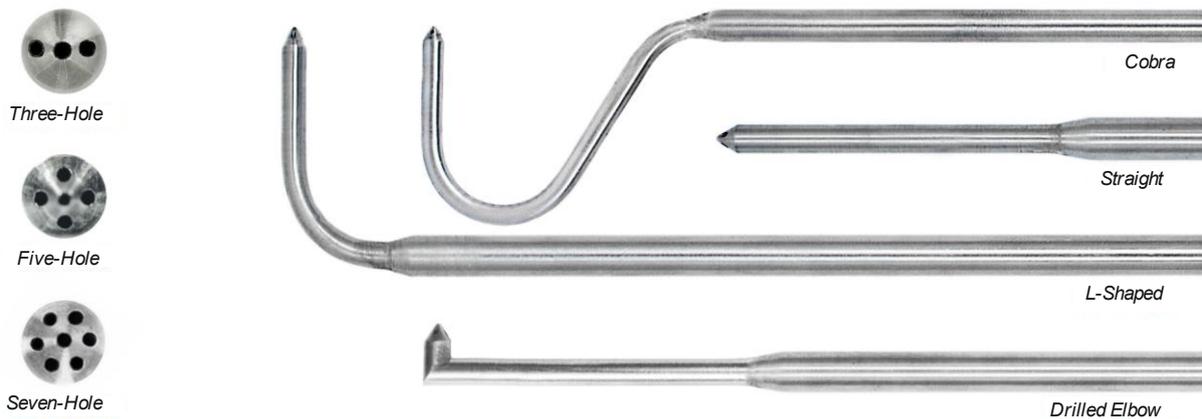


Abbildung 2.2: Auswahl verschiedener Mehrlochsonden [4]

In der vorliegenden Diplomarbeit wird die Kalibrierung von Drei- und Fünflochsonden genauer betrachtet und eine automatisierte Verstellereinrichtung für diese entworfen.

2.1. Dreilochsonden

Bei Dreilochsonden handelt es sich um pneumatische Strömungssonden, mit denen es möglich ist, den Betrag der Strömungsgeschwindigkeit und den zugehörigen Anströmwinkel in der Ebene zu bestimmen. Der Geschwindigkeitsvektor wird indirekt über die Messung der Drücke an den Bohrungen der Dreilochsonde bestimmt. Dreilochsonden unterscheiden sich, je nach Ausführung der Kopfgeometrie, in Trapez- und Zylindersonden. In der Literatur gibt es verschiedene Definitionen für die Nummerierung der Bohrungen. Am Institut und in dieser Diplomarbeit wird die einheitliche Definition aus Abbildung 2.3 verwendet.

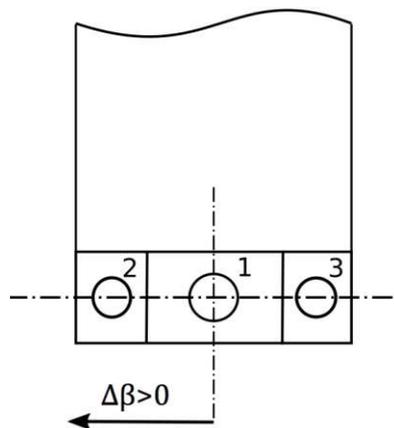


Abbildung 2.3: Nummerierung der Messbohrungen, Dreilochsonde [5]

Der Anströmwinkel des Geschwindigkeitsvektors wird hier als Gierwinkel $\Delta\beta$ bezeichnet. In Abbildung 2.4 ist die positive Definition des Gierwinkels und die zugehörige Gierebene, in welcher der Strömungsvektor gemessen werden kann, zu

sehen. Von einem positivem Gierwinkel wird also gesprochen, wenn die Strömungsrichtung auf die Bohrung 2 trifft.

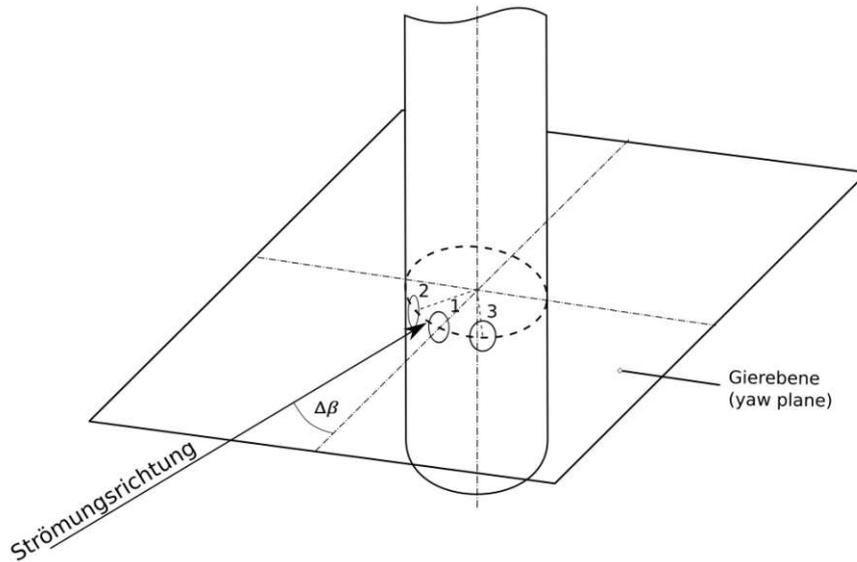


Abbildung 2.4: Definition des Anströmwinkels, Dreilochsonde [5]

Die automatische Verstelleinrichtung, welche in dieser Arbeit behandelt wird, soll vor allem auf die am Institut vorhandenen Strömungssonden ausgelegt sein. In Tabelle 2.1 ist eine Übersicht der am Institut verfügbaren Dreilochsonden mit den wichtigsten geometrischen Abmessungen zu sehen.

Tabelle 2.1: Übersicht Dreilochsonden E302

Bezeichnung	d_K [mm]	δ [°]	a [mm]	d_S [mm]	l [mm]
SVUSS/3 Kobrasonde	2,4	30	1,6	6	560
AVA Trapezsonde Nr. 110	3,3	30	2	6	295
AVA Trapezsonde Nr. 111	3,2	30	2	6	295
AVA Trapezsonde Nr. 72	3,2	30	2	6	295
AVA Zylindersonde Nr. 43	3	50	2,3	6	295

Mit d_K wird hier der Durchmesser des Sondenkopfes bezeichnet. Dieser ist vor allem für die Kalibrierung der Sonden wichtig. Der charakteristische Flankenwinkel des Sondenkopfes wird mit δ bezeichnet. Mit a wird der Abstand zwischen den seitlichen Bohrungen des Sondenkopfes angegeben. Der Durchmesser des Sondenschaftes und die Sondenlänge werden mit d_S und l angegeben.

2.2. Fünflochsonden

Fünflochsonden funktionieren nach dem gleichen Prinzip wie die zuvor erwähnten Dreilochsonden. Durch die Erweiterung auf fünf Löcher ist es nicht nur möglich den Geschwindigkeitsvektor in der Ebene, sondern im Raum zu bestimmen. Je nach Ausführung der Kopfgeometrie, wird bei Fünflochsonden von Kegel-, Pyramiden-, Kugel- oder Zylindersonden gesprochen. Auch hier gibt es in der Literatur unterschiedliche Definitionen der Bohrungsnummern und der positiven Zählrichtung der beiden Winkel. Die in dieser Diplomarbeit gewählte Definition der Bohrungsnummern ist in Abbildung 2.5 zu sehen.

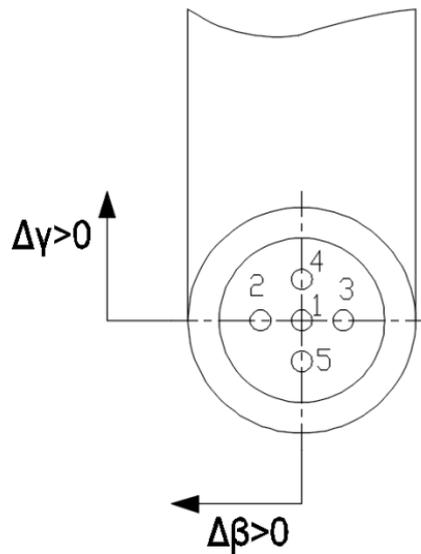


Abbildung 2.5: Nummerierung der Messbohrungen, Fünflochsonde [6]

Der Strömungsvektor besteht nun aus der Strömungsgeschwindigkeit und den beiden projizierten Winkeln des Strömungsvektors auf die Gier- und die Nickebene. In Abbildung 2.6 sind die positiven Zählrichtungen des Gier- und des Nickwinkels zu sehen. Mithilfe der Druckdifferenz von Bohrung 2 und 3 kann der Gierwinkel $\Delta\beta$ angegeben werden. Es wird, wie bei der Dreilochsonde, von einem positivem Gierwinkel gesprochen, wenn sich die Strömungsrichtung in Richtung der Bohrung 2 bewegt. Der Nickwinkel $\Delta\gamma$ kann durch die Druckdifferenz der Bohrungen 4 und 5 angegeben werden. Dieser wird als positiv definiert, wenn die Strömungsrichtung auf die Bohrung 4 trifft.

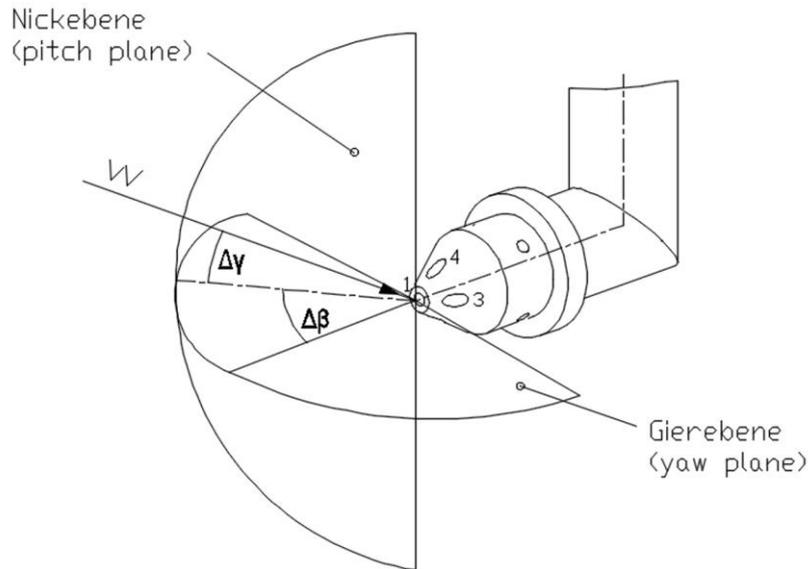


Abbildung 2.6: Definition des Anströmwinkels, Fünflochsonde [7]

In Tabelle 2.2 sind die am Institut vorhandenen Fünflochsonden, mit ihren wichtigsten geometrischen Größen, angegeben.

Tabelle 2.2: Übersicht Fünflochsonden E302

Bezeichnung	d_K [mm]	δ [°]	a [mm]	d_S [mm]	l [mm]
SVUSS/5 Kegelsonde	3	30	1,6	6	560
US DA-125-24-F-22-C	3,175	40	2,4	6,35	610
US DA-125-18-F-16-C	3,175	40	2,4	6,35	457
AVA Vierfachrohr Nr. 134	4	30	2	7	420
AVA Vierfachrohr Nr. 203	4	30	2	7	470

Die automatische Verstelleinrichtung muss also in der Lage sein, Sonden mit den Schaftdurchmessern 6; 6,35 und 7mm aufzunehmen. Die Schaftlänge l der Fünflochsonden limitiert den möglichen Nickwinkelbereich bei der Kalibrierung, wodurch der Abstand x zwischen der Düse des Freistrahwindkanals und des Sondenkopfes variabel gestaltet werden soll.

3. Strömungsmechanische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die strömungsmechanischen Grundlagen beleuchtet, die benötigt werden, um eine Kalibrierung und die anschließende Auswertung einer pneumatischen Strömungssonde durchzuführen. Eine einfache Betrachtung der benötigten Gleichungen, liefert die Stromfadentheorie. In Abbildung 3.1 ist die Darstellung einer Stromröhre und deren Übergang zum Stromfaden zu sehen.

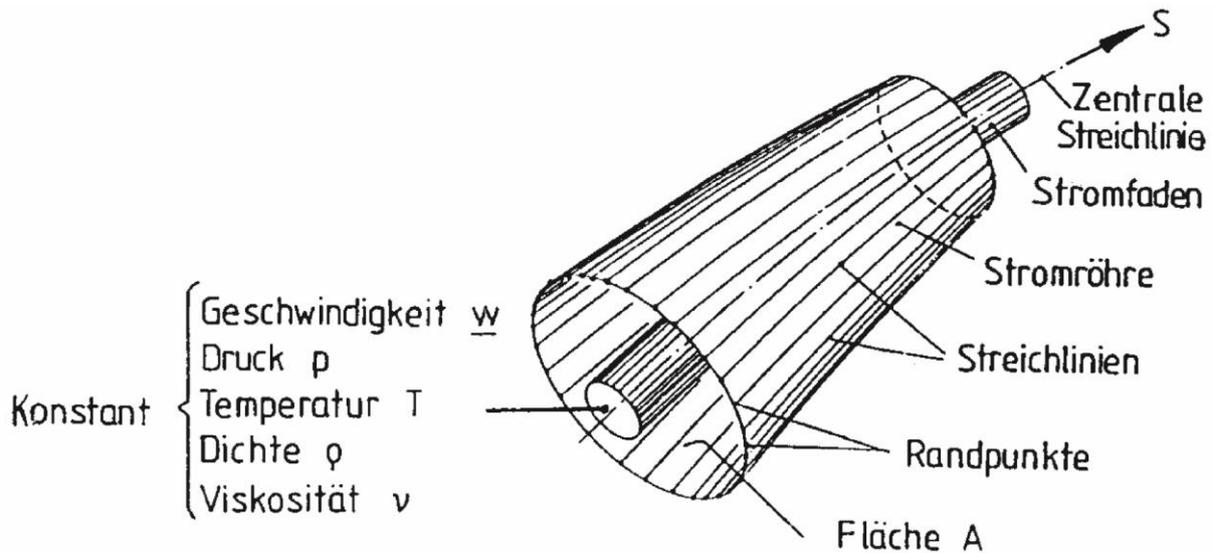


Abbildung 3.1: Stromröhre und Übergang zum Stromfaden [8]

Die Stromröhre ist ein Konzept aus der Strömungsmechanik und beschreibt das Fluid, welches sich innerhalb des Mantels von Streichlinien bewegt. Diese Streichlinien verlaufen durch die Randpunkte einer beliebig großen ortsfesten Fläche A . Dabei bleibt der Massenstrom durch die Stromröhre konstant, da kein Fluid den Mantel durchdringen kann. Wird der Querschnitt der Stromröhre so weit verkleinert, dass alle relevanten strömungsmechanischen Größen als konstant angesehen werden können, spricht man von einem Stromfaden. Bei diesen strömungsmechanischen Größen handelt es sich um die Geschwindigkeit w , den Druck p , die Temperatur T , die Dichte ρ und die kinematische Viskosität ν . [8]

3.1. Massenerhaltung

Die integrale Massenerhaltung für einen Stromfaden lautet

$$\frac{dM_0}{dt} + \int_{A_0} \rho \cdot \vec{w} \cdot d\vec{A} = 0. \quad (3.1)$$

Auf der linken Seite der Gleichung ist die zeitliche Ableitung der momentanen Masse des Fluids zu sehen. Bei einer stationären Strömung ist M_0 konstant und der linke Teil

der Gleichung verschwindet. Da das Fluid nicht den Mantel des Stromfadens durchdringen kann, tragen nur die beiden Stirnflächen des Kontrollvolumens einen Beitrag zum Oberflächenintegral auf der rechten Seite. Dadurch ergibt sich die folgende Gleichung, die besagt, dass, bei einer stationären Strömung, der Massenstrom \dot{m} durch jeden Stromfadenquerschnitt entlang eines Stromfadens konstant sein muss. [9]

$$\dot{m} = \rho \cdot w \cdot A = \text{const.} \quad (3.2)$$

Handelt es sich zusätzlich um ein inkompressibles Fluid ($\rho = \text{const.}$), muss auch der Volumenstrom \dot{V} entlang eines Stromfadens konstant sein. [9]

$$\dot{V} = w \cdot A = \text{const.} \quad (3.3)$$

3.2. Bernoulli-Gleichung

Für das Kräftegleichgewicht entlang eines Stromfadens, ist hier mit

$$\frac{\partial w}{\partial t} + w \cdot \frac{\partial w}{\partial s} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial s} - g \cdot \frac{\partial z}{\partial s}, \quad (3.4)$$

die sogenannte Euler-Bewegungsgleichung zu sehen. Die Gültigkeit dieser unterliegt ein paar Voraussetzungen. Es muss sich dabei um ein homogenes, reibungsfreies Fluid handeln und die Schwerkraft muss die einzig wirkende Feldkraft sein. Die Strömungsgeschwindigkeit w muss sowohl nach der Zeit t , als auch nach der Stromfadenkoordinate s differenzierbar sein. Außerdem muss es möglich sein dem Druck p nach der Stromfadenkoordinate z und der Höhe s zu differenzieren. [8]

Wird nun eine stationäre Strömung betrachtet, verschwinden die zeitlichen Ableitungen und die Strömungsgeschwindigkeit w sowie der Druck p sind nur noch eine Funktion der Stromfadenkoordinate s . Für die Betrachtung eines inkompressiblen Fluids ($\rho = \text{const.}$), vereinfacht sich die Euler-Bewegungsgleichung zu

$$p + \rho \cdot \frac{w^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z = \text{const.} \quad (3.5)$$

Diese Gleichung wird auch als Bernoulli-Gleichung für stationäre Strömungen bezeichnet. [9]

3.3. Dimensionslose Kennzahlen

Für die Charakterisierung eines Strömungsfeldes werden oft dimensionslose Kennzahlen verwendet. Die wichtigsten davon für die Kalibrierung von pneumatischen Strömungssonden sind die Reynoldszahl und die Machzahl. Diese werden in weiterer Folge genauer erklärt.

3.3.1. Reynoldszahl

Die Reynoldszahl ist eine dimensionslose Kennzahl, die das Verhältnis von Trägheitskräften zu Viskositätskräften in einem Fluid beschreibt. Für den Fall von Rohrströmungen wird sie durch folgende Gleichung beschrieben.

$$Re = \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Viskositätskräfte}} = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (3.6)$$

Sie wird durch das Verhältnis aus dem Produkt der Strömungsgeschwindigkeit w und der charakteristischen Länge d , zu der kinematischen Viskosität ν angegeben. Bei pneumatischen Strömungssonden wird der Durchmesser des Sondenkopfes d_k als charakteristische Länge verwendet. Die Reynoldszahl gibt an, ob eine Strömung laminar oder turbulent ist. Bei kleinen Reynoldszahlen wird von einer laminaren Strömung gesprochen. Bei höheren Reynoldszahlen wird die Strömung turbulent. Bei welcher Reynoldszahl der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung stattfindet ist abhängig vom umströmten bzw. durchströmten Körper und kann daher nicht als ein fixer Wert definiert werden. [10]

3.3.2. Machzahl

Die Machzahl ist eine dimensionslose Kennzahl, die durch das Verhältnis der Trägheitskräfte und der elastischen Kräfte angegeben wird. Sie lässt sich auf das Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeit w zur Schallgeschwindigkeit w_0 reduzieren und wird durch folgende Gleichung angegeben.

$$Ma = \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{elastische Kräfte}} = \frac{w}{w_0} \quad (3.7)$$

Die Machzahl ist ein Indikator dafür, ob die vorhandene Strömung näherungsweise als inkompressibel betrachtet werden kann. Bei Gasen liegt diese Grenze bei $Ma < 0,2$. Da die Kalibrierungen der pneumatischen Strömungssonden bei entsprechend geringen Machzahlen durchgeführt werden, kann die Strömung als inkompressibel angenommen werden und es gelten die Gleichungen (3.2) und (3.5). [10]

3.4. Zusätzliche Gleichungen

Für die vollständige Beschreibung der Gleichungen sind noch die Definitionen der kinematischen Viskosität ν , der Dichte ρ der Schallgeschwindigkeit w_0 nötig.

3.4.1. Kinematische Viskosität

Die kinematische Viskosität kann durch folgende Näherungsformel angegeben werden.

$$\nu = (0,93 \cdot T + 134,7) \cdot 10^{-7} \quad \text{in} \quad [m^2/s] \quad (3.8)$$

Sie hängt also nur von der Temperatur T ab und ist gültig für einen Temperaturbereich von $10 - 30^\circ C$ und einem Druck von 1bar . Für die richtige Anwendung der Gleichung muss die Temperatur T in der Einheit $^\circ C$ angegeben werden. Die Gleichung entstammt einer linearen Interpolation der kinematischen Viskosität für trockene Luft, aus dem VDI-Wärmeatlas [11], bei 1bar Umgebungsdruck und einem Temperaturbereich von $10 - 30^\circ C$.

3.4.2. Dichte der Luft

Die Dichte kann unter Anwendung der idealen Gasgleichung

$$p \cdot \nu = R \cdot T \quad (3.9)$$

berechnet werden. Die spezifische Gaskonstante R nimmt für das vorliegende Medium, trockene Luft, den Wert 287 J/kgK an. Das spezifische Volumen ν kann auch durch den Kehrwert der Dichte ρ angegeben werden. Dadurch lässt sich die Dichte durch folgende Gleichung berechnen.

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} \quad (3.10)$$

T gibt hier wieder die Temperatur und p den Druck an. [12]

3.4.3. Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit w_0 hängt vom betrachteten Fluid und der Temperatur T ab und wird durch folgende Formel berechnet.

$$w_0 = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T} \quad (3.11)$$

Der Isentropenexponent κ hat, im Falle dieser Diplomarbeit, bei der Verwendung trockener Luft unter Umgebungsbedingungen den Wert 1,4. Bei einer Temperatur von 20°C , ergibt sich für das Medium Luft eine Schallgeschwindigkeit von 343 m/s . [10]

4. Kalibrierung pneumatischer Strömungssonden

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten die Komponenten der Strömung mit pneumatischen Strömungssonden zu messen, das Abgleichverfahren (engl. nulling method) und das Ausschlagverfahren (engl. non-nulling method). Die beiden Verfahren unterscheiden sich in ihrer Anwendungsart, den benötigten Informationen, in Form von Kalibrierkurven, und ihrer Genauigkeit. Beide Verfahren können sowohl mit Dreilochsonden als auch mit Fünflochsonden verwendet werden und werden in der Folge für die Fünflochsonde erklärt. [13]

Beim Abgleichverfahren wird die Fünflochsonde zunächst so in der Strömung positioniert, dass der Gierwinkel $\Delta\beta$ und der Nickwinkel $\Delta\gamma$ beide null sind. Danach wird die Sonde so lange verdreht bis sich die Drücke der seitlichen Bohrungen ausgleichen. Die nötige Verdrehung um $p_2 = p_3$ zu erreichen, gibt den Gierwinkel $\Delta\beta$ der Strömung an. Analog dazu gibt die Verdrehung um $p_4 = p_5$ zu erreichen, den Nickwinkel $\Delta\gamma$. Die Verstellung des Nickwinkels ist in der Praxis, aufgrund von Platzgründen, jedoch meistens nicht möglich. Daher werden Kalibrierkurven zur Bestimmung des Nickwinkels und des statischen Druckes benötigt. Die Messung gestaltet sich jedoch als sehr zeitintensiv, da die Sonde für jede Messung neu ausgerichtet werden muss. Weiters wird vorausgesetzt, dass die Sonde ein symmetrisches Druckverhalten aufweist, was beispielsweise in Majumdar et al. [13] und auch bei den am Institut vorhandenen Sonden, nicht immer der Fall sein muss.

Eine praktischere Anwendung bietet das Ausschlagverfahren. Hier wird die Sonde in einer nicht veränderbaren Orientierung, im Normalfall 0° für Gierwinkel $\Delta\beta$ sowie Nickwinkel $\Delta\gamma$, in der Strömung ausgerichtet und die Bohrungsdrücke gemessen. Mittels Kalibrierkurven kann der Gierwinkel $\Delta\beta$ und der Nickwinkel $\Delta\gamma$ der Anströmung sowie die Strömungsgeschwindigkeit w berechnet werden. Die Sonde muss demnach bei der Messung in derselben Orientierung eingebaut werden wie bei der vorangegangenen Kalibrierung. Dieses Verfahren bietet signifikante Vorteile in Messumgebungen, wo eine benötigte Rotation der Sonde, um das Abgleichverfahren anzuwenden, nicht möglich ist. Majumdar et al. [13] empfehlen das Ausschlagverfahren bei Anwendung einer Fünflochsonde für einen Anströmungsbereich von $\pm 30^\circ$, welcher auch in dieser Diplomarbeit verwendet wird. Beim Aufnehmen mehrerer Messungen hintereinander, entsteht bei diesem Verfahren ein erheblicher zeitlicher Vorteil.

4.1. Bohrungskoeffizienten

Der an der Bohrung i gemessene Druck p_i lässt sich bei Machzahlen $Ma < 0,2$, und der, dadurch näherungsweise inkompressiblen Betrachtung, in zwei Teile aufteilen. Er besteht aus dem Umgebungsdruck p_u und einem gewissen Anteil k_i des dynamischen Druckes p_{dyn} .

$$p_i = p_u + k_i \cdot p_{dyn} \quad \text{bzw.} \quad p_i = p_u + k_i \cdot \rho \frac{w^2}{2} \quad (4.1)$$

Dieser dimensionslose Anteil wird auch als Bohrungskoeffizient k_i bezeichnet. Die Bohrungskoeffizienten stellen die an den Bohrungen anliegenden dimensionslosen Drücke dar und werden wie folgt berechnet.

$$k_i = \frac{p_i - p_u}{\rho \cdot \frac{w^2}{2}} \quad (4.2)$$

Demnach ergeben sich bei der Dreilochsonde drei und bei der Fünflochsonde fünf Bohrungskoeffizienten. Diese sind abhängig vom Anströmwinkel ($\Delta\beta$ und $\Delta\gamma$), der Reynoldszahl, der Machzahl und dem Turbulenzgrad der Anströmung. Außerdem gelten sie für eine bestimmte Geometrie des Sondenkopfes. [2], [14]

4.2. Kalibrierkoeffizienten nach Treaster und Yocum

Einen direkteren Zusammenhang mit den Anströmwinkeln $\Delta\beta$ und $\Delta\gamma$ liefern sogenannte Kalibrierkoeffizienten. In der Literatur sind viele unterschiedliche Definitionen dieser zu finden. In der vorliegenden Diplomarbeit wird die Definition von Treaster und Yocum [1], bestehend aus dem Gierwinkelkoeffizienten k_β , dem Nickwinkelkoeffizienten k_γ , dem Totaldruckkoeffizienten k_t und dem statischen Druckkoeffizienten k_s , verwendet. Diese sind so definiert, dass sie unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und nur eine Funktion der Anströmwinkel sind.

Der Gierwinkelkoeffizient k_β hängt von den Bohrungsdrücken p_1 , p_2 und p_3 , sowie dem mittleren Druck \bar{p} ab. Er kann auch aus den dimensionslosen Bohrungskoeffizienten k_1 , k_2 und k_3 , und dem mittleren Bohrungskoeffizienten \bar{k} gebildet werden. Der Gierwinkelkoeffizient wird wie folgt definiert.

$$k_\beta = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - \bar{p}} = \frac{k_2 - k_3}{k_1 - \bar{k}} \quad (4.3)$$

Analog dazu wird der Nickwinkelkoeffizient k_γ aus den Bohrungsdrücken p_1 , p_4 und p_5 , sowie dem mittleren Druck \bar{p} definiert. Dieser entfällt bei der Kalibrierung einer Dreilochsonde.

$$k_\gamma = \frac{p_4 - p_5}{p_1 - \bar{p}} = \frac{k_4 - k_5}{k_1 - \bar{k}} \quad (4.4)$$

Der Totaldruckkoeffizient k_t besteht aus dem Bohrungsdruck p_1 , dem Totaldruck p_t und dem mittleren Druck \bar{p} .

$$k_t = \frac{p_1 - p_t}{p_1 - \bar{p}} = \frac{k_1 - 1}{k_1 - \bar{k}} \quad (4.5)$$

Der statische Druckkoeffizient k_s wird aus dem Bohrungsdruck p_1 , dem Umgebungsdruck p_u und dem mittleren Druck \bar{p} definiert.

$$k_s = \frac{\bar{p} - p_u}{p_1 - \bar{p}} = \frac{\bar{k}}{k_1 - \bar{k}} \quad (4.6)$$

Der mittlere Druck \bar{p} hat je nach Verwendung einer Drei- oder Fünflochsonde eine unterschiedliche Definition. Bei der Dreilochsonde besteht er aus den beiden Drücken der seitlichen Bohrungen p_2 und p_3 .

$$\bar{p} = \frac{p_2 + p_3}{2} \quad (4.7)$$

Bei der Fünflochsonde werden die Drücke der vier seitlichen Bohrungen p_2 , p_3 , p_4 und p_5 herangezogen.

$$\bar{p} = \frac{p_2 + p_3 + p_4 + p_5}{4} \quad (4.8)$$

Analog dazu wird auch der mittlere Bohrkoeffizienten \bar{k} für die Drei- und Fünflochsonde definiert.

$$\bar{k} = \frac{k_2 + k_3}{2} \quad (4.9)$$

$$\bar{k} = \frac{k_2 + k_3 + k_4 + k_5}{4} \quad (4.10)$$

4.3. Methode der Stromlinienprojektion

Neben der experimentellen Bestimmung der Kalibrierkoeffizienten, ist es auch möglich diese mit Hilfe der Methode der Stromlinienprojektion zu berechnen. Die Projektion des Geschwindigkeitsvektors der Anströmung auf die Bohrungen der Sonde bildet die Grundlage dieser Methode. Die Komponente der Geschwindigkeit, die senkrecht zur Oberfläche der Sonde verläuft, trägt einen Teil des dynamischen Drucks bei, der zum statischen Druck addiert wird und somit als Bohrungsdruck wirksam wird.

Auf die genaue Herleitung dieser Methode wird in dieser Diplomarbeit nicht eingegangen. Diese kann jedoch in Chondrokostas [6] oder Hilgert [7] nachgelesen werden.

4.3.1. Bohrungskoeffizienten

Wird die Methode der Stromlinienprojektion auf die Bohrungskoeffizienten angewandt, stellt sich heraus, dass diese nur von dem Gierwinkel $\Delta\beta$, dem Nickwinkel $\Delta\gamma$ und dem charakteristischen Flankenwinkel des Sondenkopfes δ abhängig sind. Die Gleichungen der fünf Bohrungskoeffizienten ergeben sich zu

$$k_1 = (\cos \Delta\gamma \cdot \cos \Delta\beta)^2, \quad (4.11)$$

$$k_2 = (\cos \Delta\gamma \cdot \sin(\delta + \Delta\beta))^2, \quad (4.12)$$

$$k_3 = (\cos \Delta\gamma \cdot \sin(\delta - \Delta\beta))^2, \quad (4.13)$$

$$k_4 = \left(\frac{\cos \Delta\beta \cdot \cos \Delta\gamma}{\cos \varphi} \cdot \sin(\delta + \varphi) \right)^2, \quad (4.14)$$

$$k_5 = \left(\frac{\cos \Delta\beta \cdot \cos \Delta\gamma}{\cos \varphi} \cdot \sin(\delta - \varphi) \right)^2. \quad (4.15)$$

Der Winkel φ wird mit folgender Gleichung berechnet.

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\tan \Delta\gamma}{\cos \Delta\beta} \right) \quad (4.16)$$

4.3.2. Kalibrierkoeffizienten

Werden nun die Gleichungen (4.11) bis (4.15) in die Gleichungen (4.3) bis (4.6) eingesetzt, ergeben sich die Kalibrierkoeffizienten nach Treaster und Yocum [1]. Diese sind ebenfalls nur abhängig von dem Gierwinkel $\Delta\beta$, dem Nickwinkel $\Delta\gamma$ und dem

charakteristischen Flankenwinkel des Sondenkopfes δ und werden durch die folgenden Gleichungen angegeben.

$$k_{\beta} = \frac{\cos^2 \Delta\gamma \cdot (\sin(\delta + \Delta\beta) - \sin(\delta - \Delta\beta))^2}{(\cos \Delta\gamma \cdot \cos \Delta\beta)^2 - \bar{k}} \quad (4.17)$$

$$k_{\gamma} = \frac{\left(\frac{\cos \Delta\beta \cdot \cos \Delta\gamma}{\cos \varphi}\right)^2 \cdot (\sin(\delta + \Delta\beta) - \sin(\delta - \Delta\beta))^2}{(\cos \Delta\gamma \cdot \cos \Delta\beta)^2 - \bar{k}} \quad (4.18)$$

$$k_t = \frac{(\cos \Delta\gamma \cdot \cos \Delta\beta)^2 - 1}{(\cos \Delta\gamma \cdot \cos \Delta\beta)^2 - \bar{k}} \quad (4.19)$$

$$k_s = \frac{\bar{k}}{(\cos \Delta\gamma \cdot \cos \Delta\beta)^2 - \bar{k}} \quad (4.20)$$

Der mittlere Bohrungskoeffizient \bar{k} ausgedrückt durch diese drei Winkel lautet

$$\bar{k} = \frac{1}{4} \cdot \left((\cos \Delta\gamma \cdot \sin(\delta + \Delta\beta))^2 + (\cos \Delta\gamma \cdot \sin(\delta - \Delta\beta))^2 + \left(\frac{\cos \Delta\beta \cdot \cos \Delta\gamma}{\cos \varphi} \cdot \sin(\delta + \varphi)\right)^2 + \left(\frac{\cos \Delta\beta \cdot \cos \Delta\gamma}{\cos \varphi} \cdot \sin(\delta - \varphi)\right)^2 \right). \quad (4.21)$$

4.4. Ablauf der Kalibrierung

Die Kalibrierung von pneumatischen Strömungssonden erfolgt mit Hilfe eines Freistrahwindkanals. Die am Institut vorhandene Versuchsumgebung wird in Kapitel 5 genauer beschrieben. Die Strömungssonde wird in Richtung der Strömung vor dem Freistrahwindkanal platziert. Anschließend werden für einen vordefinierten Winkelbereich mehrere Strömungswinkel eingestellt und die Drücke der Bohrungen gemessen. In dieser Diplomarbeit wird ein Winkelbereich von $\pm 30^\circ$ und eine Schrittgröße von 5° verwendet. Dies ergibt bei einer Dreilochsonde 13 und bei einer Fünflochsonde 169 Druckmessungen. Aus den gemessenen Drücken werden die Kalibrierkoeffizienten aus dem vorigen Kapitel berechnet.

Wie die Kalibrierkurven bei einer Dreilochsonde aussehen können, wird in Abbildung 4.1 gezeigt. Die drei Kalibrierkoeffizienten k_{β} , k_t und k_s sind hier über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ aufgetragen.

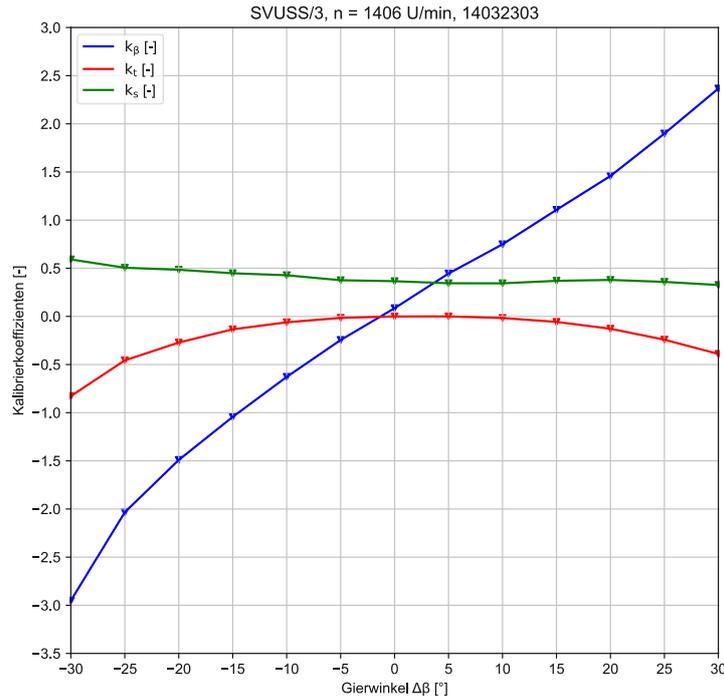


Abbildung 4.1: Beispielhafte Darstellung der Kalibrierkurven einer Dreilochsonde

Für die Fünflochsonde wird nicht mehr von Kalibrierkurven, sondern von Kalibrierfeldern gesprochen. In Abbildung 4.2 wird gezeigt wie diese Kalibrierfelder für eine Fünflochsonde aussehen können. Auf der linken Seite ist der Nickwinkelkoeffizient k_γ , aufgetragen über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ und dem Nickwinkel $\Delta\gamma$, zu sehen. Auf der rechten Seite sieht man das Kalibrierfeld des Totaldruckkoeffizienten k_t , ebenfalls aufgetragen über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ und dem Nickwinkel $\Delta\gamma$.

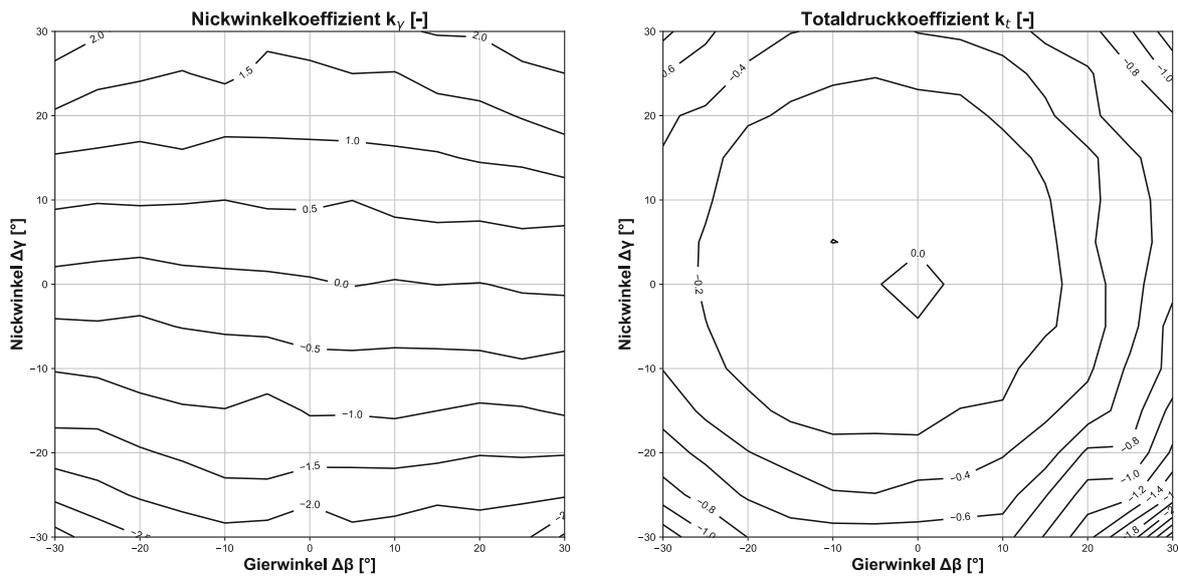


Abbildung 4.2: Beispielhafte Darstellung des Kalibrierfeldes einer Fünflochsonde für den Nickwinkelkoeffizienten (links) und den Totaldruckkoeffizienten (rechts)

In beiden Abbildungen (Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2) ist zu sehen, dass die pneumatischen Strömungssonden, wie auch schon in Majumdar et al. [13] gezeigt, in der Regel kein symmetrisches Verhalten aufweisen. Die nicht vorhandene Symmetrie der Ergebnisse ist vor allem auf Ungenauigkeiten in der Fertigung zurückzuführen. Dies bestätigt den Vorteil des Ausschlagverfahrens gegenüber dem Abgleichverfahren. Im Vergleich zu Abbildung 4.2, sind in Abbildung 4.3 auf der linken Seite das Kalibrierfeld des Nickwinkelkoeffizienten k_γ und auf der rechten Seite das Kalibrierfeld des Totaldruckkoeffizienten k_t zu sehen, welche mit Hilfe des Stromlinienprojektionsverfahrens berechnet wurden.

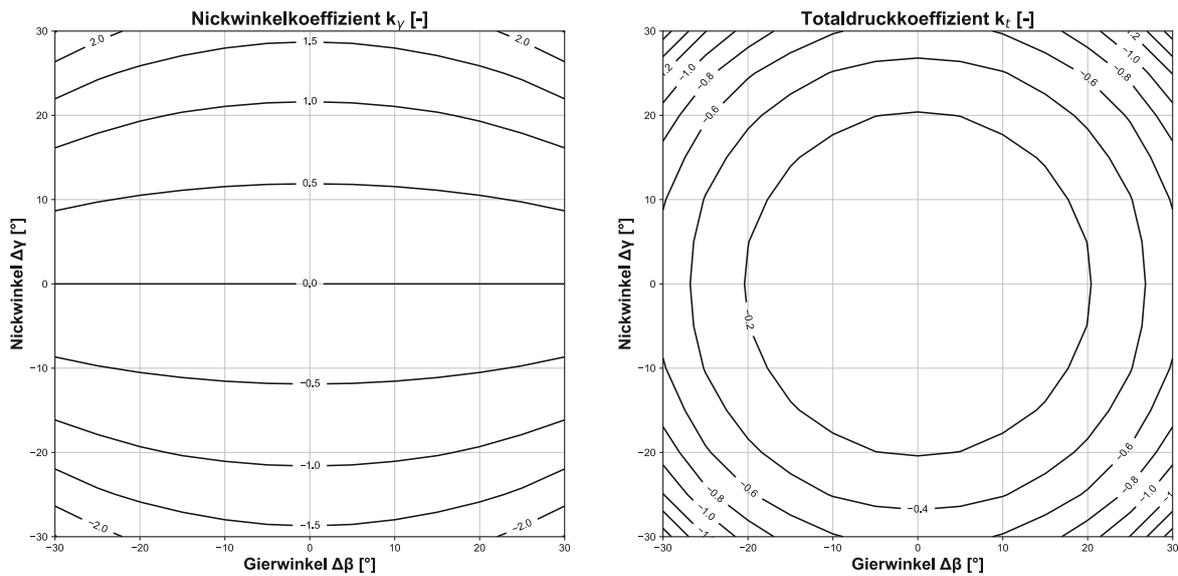


Abbildung 4.3: Beispielhafte Darstellung des Kalibrierfeldes einer Fünflochsonde für den Nickwinkelkoeffizienten (links) und den Totaldruckkoeffizienten (rechts) mit Hilfe des Stromlinienprojektionsverfahrens

4.5. Einflussfaktoren auf die Kalibrierung pneumatischer Strömungssonden

Es gibt einige Einflussfaktoren, die sich auf die Kalibrierung pneumatischer Strömungssonden und die anschließende Strömungsmessung auswirken können. Die wichtigsten davon werden in diesem Kapitel erläutert.

4.5.1. Einfluss der Reynoldszahl

Die Reynoldszahl ist neben der Geometrie des Sondenkopfes der wichtigste Einflussfaktor bei den Messungen mit pneumatischen Strömungssonden. Die Kalibrierung erfolgt bei einer festgesetzten Reynoldszahl. Die Reynoldszahl bei den Messungen unterscheidet sich jedoch meist von dieser, wodurch Messfehler entstehen. Bei Untersuchungen von Dominy und Hodson [15], sowie von Lee und Jun

[16], stellte sich heraus, dass der Einfluss der Reynoldszahl vom Gierwinkel $\Delta\beta$ und Nickwinkel $\Delta\gamma$ abhängt. Hier wurden drei verschiedene Effekte ersichtlich.

Der Einfluss der Reynoldszahl auf die Richtungskoeffizienten k_β und k_γ tritt vor allem im Gier- und Nickwinkelbereich unter 20° auf. Es wurde beobachtet, dass bei zunehmender Reynoldszahl, auch die Absolutwerte der Richtungskoeffizienten steigen.

Beim statischen Druckkoeffizienten k_s macht sich der Reynoldszahleffekt über den gesamten Winkelbereich bemerkbar. Bei steigender Reynoldszahl tendiert der statische Druckkoeffizient dazu abzunehmen.

Auch beim Totaldruckkoeffizienten k_t zeigt sich eine Sensitivität gegenüber der Reynoldszahl. Diese tritt bei Gier- und Nickwinkeln über 20° auf. Bei zunehmender Reynoldszahl nimmt auch der Totaldruckkoeffizient zu. Dieser Effekt zeigt sich am auffälligsten unter den drei besprochenen Effekten.

4.5.2. Einfluss des Turbulenzgrades

Die Kalibrierung der pneumatischen Strömungssonden erfolgt, wie schon erwähnt, unter kontrollierten Bedingungen vor einem Freistrahwindkanal. Dadurch ist davon auszugehen, dass die Kalibrierung unter einem sehr geringen Turbulenzgrad erfolgt. Aus Messungen von Derflinger [17] geht hervor, dass der Turbulenzgrad der Strömung bei ca. 1% liegt. In Abbildung 4.4 ist der gemessene Turbulenzgrad des am Institut befindlichen Freistrahwindkanals in Abhängigkeit von der Motordrehzahl n zu sehen.

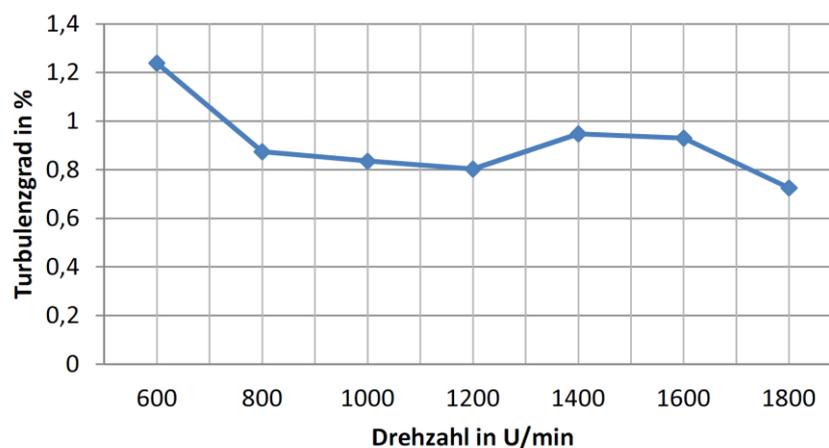


Abbildung 4.4: Turbulenzgrad in Abhängigkeit der Drehzahl [17]

Bei realen Messungen in Thermischen Turbomaschinen, treten jedoch weitaus höhere Turbulenzgrade auf, wodurch sich Fehler in den Messungen ergeben. Aus Untersuchungen von Sitaram et al. [18] geht hervor, dass ein Turbulenzgrad von 10% zu einem Fehler von 0,67% beim Nickwinkelkoeffizienten k_γ führt. Ein Turbulenzgrad

von 20% führt hier schon zu einem Fehler von 2,68%. Der erwartete Fehler der Absolutgeschwindigkeit bei einer Messung mit einem Turbulenzgrad von 10%, liegt daher, laut Sitaram et al. [18], bei rund 0,33%. Betrachtet man die einzelnen Komponenten der Geschwindigkeit, variiert dieser Fehler je nach Gier- und Nickwinkel.

4.5.3. Einfluss des Geschwindigkeitsgradienten

Wie schon beim Turbulenzgrad, treten bei Messungen in Thermischen Turbomaschinen deutlich höhere Geschwindigkeits- und Druckgradienten auf als bei der Kalibrierung. Dieser von Sitaram et al. [18] untersuchte Effekt kann die Messgenauigkeit auf drei Arten beeinflussen.

Zum einen zeigen die Sonden den Messwert an einer Stelle an, die sich vom geometrischen Zentrum der Sonde unterscheidet. Dieser Effekt wird als Verdrängungseffekt bezeichnet und wurde bereits ausgiebig für das Pitot-Rohr und die Dreilochsonde untersucht.

Zum anderen befindet sich jedes Loch bei Mehrlochsonden in einem unterschiedlichen Druckfeld, was zu einem zusätzlichen Fehler führt. Dies wird als räumlicher Fehler bezeichnet und kann bei einer Fünflochsonde der dominierende Fehler sein.

Schließlich führt die Anwesenheit der Sonde in einem Geschwindigkeitsgradienten zu einer Ablenkung der Strömungslinien in Richtung der Region mit niedrigerer Geschwindigkeit. Dadurch zeigt die Sonde Drücke an, die höher sind als die Drücke die an derselben Stelle wirken würden, ohne die Anwesenheit der Sonde.

4.5.4. Effekte durch Wandnähe

Da bei der Messung in Thermischen Turbomaschinen nicht besonders viel Platz zur Verfügung steht, werden die pneumatischen Strömungssonden oft in der Nähe von festen Wänden verbaut. Dadurch entstehen Messfehler, die einerseits auf Geschwindigkeitsgradienten zufolge der Grenzschicht entlang der Wand, andererseits auf der Wechselwirkung zwischen Wand und Strömungssonde (engl. wall proximity effect) beruhen. Laut experimentellen Messungen von Sitaram et al. [18] und Willinger [19] steigt die gemessene Geschwindigkeit je näher sich die Strömungssonde an der Wand befindet.

Wenn eine Sonde sehr nahe am hinteren Rand einer Schaufel platziert wird, entstehen viskose und nicht viskose Interferenzen zwischen der Sonde und dem hinteren Rand. Außerdem entstehen Versperrungseffekte und Einflüsse durch Geschwindigkeits- und Druckgradienten, die in Kapitel 4.5.3 beschrieben sind. Die Komplexität der Interaktion zwischen der Sonde und dem hinteren Rand macht eine Schätzung des Fehlers bei den Messungen mit pneumatischen Strömungssonden unmöglich. Die Ergebnisse in

unmittelbarer Nähe zum hinteren Rand sollten mit Vorsicht betrachtet werden. Um diese Messfehler zu vermeiden, sollte der Abstand zwischen der Sonde und der Hinterkante der Schaufel nicht kleiner als der doppelte Sondendurchmesser sein.

5. Versuchsumgebung

Um die Kalibrierung von pneumatischen Strömungssonden unter möglichst kontrollierten Bedingungen durchführen zu können, wird ein Freistrahwindkanal benötigt. In diesem Kapitel wird die vorhandene Versuchsumgebung im Labor des Instituts für Energietechnik und Thermodynamik beschrieben.

In Abbildung 5.1 ist eine Skizze des verwendeten Freistrahwindkanals zu sehen. Es ist ein Radialventilator (SIROCCO Z 10 HD 86) mit einem Laufraddurchmesser von 884 mm und einem Luftvolumenstrom von $10\,800\text{ m}^3/h$ verbaut. Dieser wird über einen drehzahlgeregelten Gleichstrommotor mit einer Leistung von 50 kW angetrieben. Das nach dem Diffusor verbaute Turbulenzsieb sorgt für ähnliche Strömungsturbulenzen über den gesamten Querschnitt. [7]

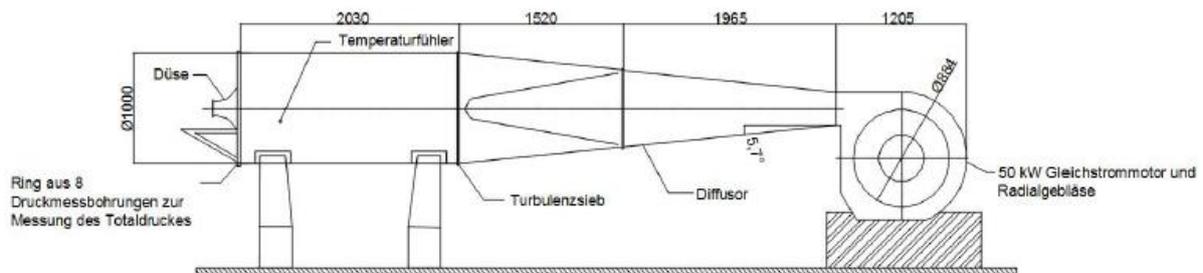


Abbildung 5.1: Skizze des Freistrahwindkanals [20]

Am Ende der rund 2 m langen Beruhigungsstrecke, mit einem Durchmesser von $1\,000\text{ mm}$ befindet sich die Witoszynski-Düse mit einem Austrittsdurchmesser von $d_n = 120\text{ mm}$. In der Beruhigungsstrecke des Windkanals wird mit Hilfe eines Rings aus 8 Druckmessbohrungen und eines Pt-100 Temperaturfühlers der Totaldruck und die Temperatur der Strömung gemessen. In Abbildung 5.2 ist die Düsengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Motordrehzahl angegeben. Bei der maximalen Drehzahl des Motors von $n = 1\,800\text{ U/min}$ kann eine ungefähre Machzahl von $Ma = 0,25$ des Freistrahls erreicht werden. Der Turbulenzgrad der Austrittsströmung bewegt sich, wie schon in Kapitel 4.5.2 beschrieben, im Bereich von rund 1% . [7]

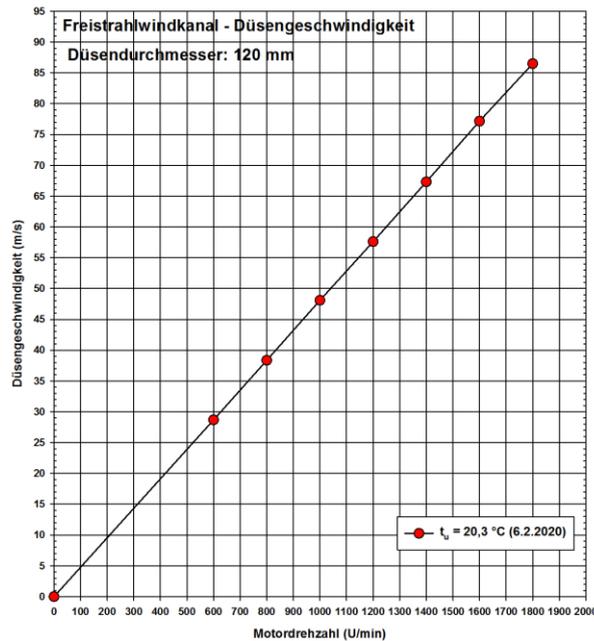


Abbildung 5.2: Düsengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Motordrehzahl [20]

Um ein homogenes Strömungsfeld nach dem Austritt aus der Düse gewährleisten zu können, soll die Sonde in einem Bereich von $0 \leq x \leq 2d_n$ stromabwärts der Düse montiert werden. Wie in Gieß et al. [21] gezeigt, fällt außerhalb dieses Bereichs der Totaldruck auf rund 75 % seines ursprünglichen Wertes ab. Je nach Art der Sonde und dem jeweiligen Modell wird der Abstand x zwischen dem Düsenaustritt und dem Sondenkopf so gewählt, dass einerseits eine kollisionsfreie Kalibrierung gewährleistet wird, andererseits der Sondenkopf möglichst nah am Düsenaustritt platziert wird. [7]

In Abbildung 5.3 ist der aktuelle Messaufbau zur Kalibrierung einer Fünflochsonde zu sehen. Das Datenerfassungs- und Steuerungssystem HP 3852A ist die zentrale Einheit der pneumatischen Messtechnik. Es setzt sich zusammen aus einem 24-Kanal Hochgeschwindigkeitsmultiplexer HP 44711A, einem 13-Bit Hochgeschwindigkeitsvoltmeter HP44702B und einem 16-Kanal Digitalausgang HP 44724A. Mithilfe des Multiplexers und des Voltmeters können die von den piezoresistiven Druckaufnehmern von HONEYWELL und dem Pt100-Widerstandsthermometer gelieferten Spannungen erfasst werden. Das Druckmessstellenumschaltgerät von FURNESS CONTROLS wird durch einen Stromimpuls des Digitalausgangs gesteuert. Zur Verbindung zwischen HP 3852A und PC wird ein GPIB-Bus verwendet und zur Steuerung kommt die Software LabVIEW 2016 von NATIONAL INSTRUMENTS zum Einsatz. [14]

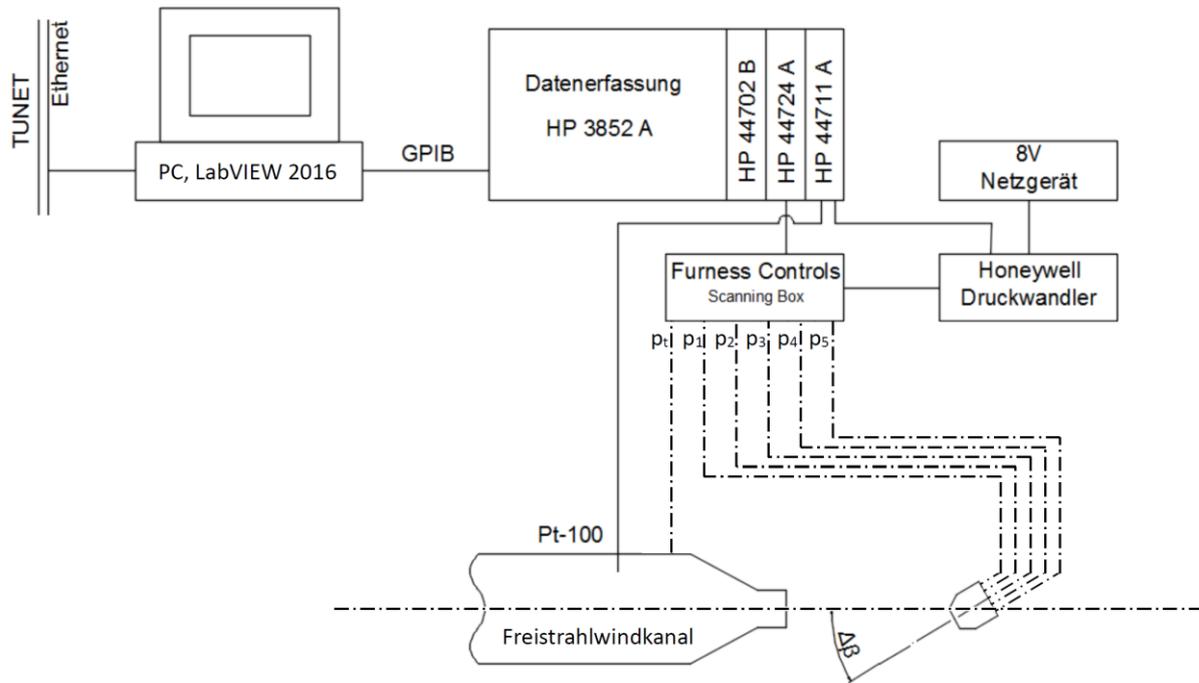


Abbildung 5.3: Messaufbau am Institut zur Kalibrierung einer Fünflochsonde [7]

Zur Messung der Drücke werden piezoresistive Druckaufnehmer 143PC01D der Firma HONEYWELL verwendet. Diese benötigen eine gewisse Ausgleichszeit, damit der gemessene Druck konvergiert. In Abbildung 5.4 ist dies anhand der Druckdifferenz $p_i - p_u$, aufgetragen über der Zeit, veranschaulicht. Diese Ausgleichszeit ist abhängig von den Durchmessern der Sondenbohrungen, der verwendeten Druckmessleitungen und der Länge dieser. Für die Kalibrierung der in dieser Diplomarbeit verwendeten Sonden wird eine Ausgleichszeit von 10s gewählt. Da immer nur ein Druck zeitgleich gemessen werden kann, ergibt sich bei einer Dreilochsonde eine Ausgleichszeit von 40s und bei einer Fünflochsonde eine Ausgleichszeit von 60s.

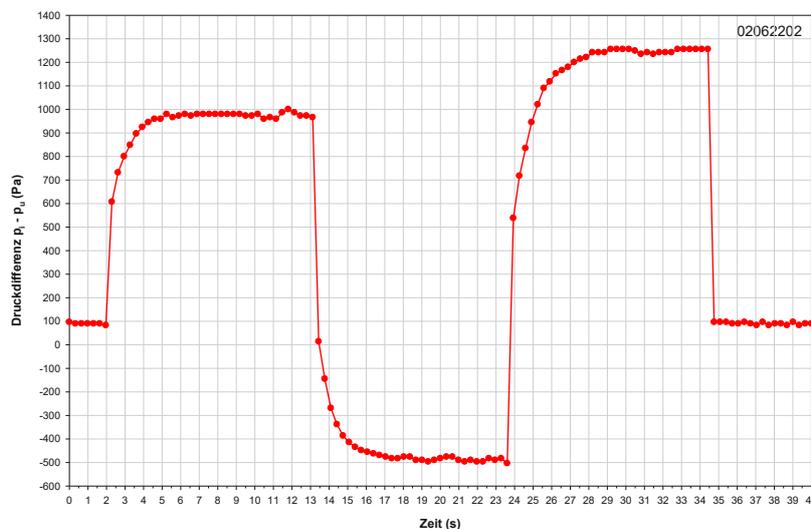


Abbildung 5.4: Druckdifferenz $p_i - p_u$, aufgetragen über der Zeit

6. Planung und Konstruktion der Verstelleinrichtung

In diesem Kapitel soll näher auf die Planung und Konstruktion der automatischen Verstelleinrichtung eingegangen werden. Die Arbeit unterscheidet sich hier einerseits in die Wahl der elektrischen Komponenten, andererseits in die Konstruktion der dazugehörigen mechanischen Komponenten. Die mechanischen Bauteile sind so ausgelegt, dass sie in der institutseigenen Werkstatt gefertigt werden können. Die Datenblätter aller verbauter Komponenten befinden sich im Anhang B.



Abbildung 6.1: Alte Verstelleinrichtung inklusive Strömungssonde [7]

In Abbildung 6.1 ist die aktuelle Verstelleinrichtung zur Sondenkalibrierung zu sehen. Der Gierwinkel $\Delta\beta$ und Nickwinkel $\Delta\gamma$ sind beide händisch einstellbar. Der Prozess der Kalibrierung gestaltet sich vor allem bei der Fünflochsonde als sehr zeitintensiv und es kann, durch Unaufmerksamkeiten, leicht zu Ungenauigkeiten in der Winkeleinstellung kommen. Händisch sind die beiden Winkel mit einer Genauigkeit von ca. $\pm 0,5^\circ$ einstellbar (mündliche Aussage von Prof. Willinger am 11. Mai 2023). Wie zu sehen ist, ist die Verstelleinrichtung direkt mit dem Freistrahwindkanal verschraubt, wodurch sich Schwingungen des Windkanals bis auf die Sonde übertragen.

Im Großteil der Literatur zur Kalibrierung von Strömungsvektorsonden wird eine automatisierte Verstelleinrichtung als gegeben betrachtet. Als Inspiration zur Umsetzung der Verstelleinrichtung in dieser Diplomarbeit dienen die Arbeiten von Georgakis et al. [22], Town und Camci [23] sowie Rozynski [24]. Diese setzen allesamt auf den Einsatz von Schrittmotoren, welche auch in dieser Arbeit verwendet werden, für die automatisierte Winkeleinstellung.

6.1. Elektrische Komponenten

Wie bereits erwähnt, soll es möglich sein, Gierwinkel $\Delta\beta$ und Nickwinkel $\Delta\gamma$ automatisch zu verstellen. Um diese automatische Verstellung zu gewährleisten, wird für jeden der beiden Winkel ein Schrittmotor verwendet.

Bei einem Schrittmotor handelt es sich um einen Elektromotor, welcher sich durch das Anlegen elektrischer Impulse in vordefinierten Schritten bewegt. Der Unterschied zu anderen Elektromotoren, welche eine kontinuierliche Drehung ausführen, ist, dass sich ein Schrittmotor in diskreten Schritten bewegt. Diese Schritte werden durch die Anzahl der elektrischen Impulse und deren Frequenz gesteuert. [25]

Die Hauptbestandteile eines Schrittmotors sind der Rotor, bestehend aus einem permanentmagnetischen Material, und der Stator, bestehend aus gewickelten Spulen. Durch das Anlegen von Stromimpulsen an die Spulen wird ein magnetisches Feld erzeugt, das den Rotor in die gewünschte Position bringt. In Abbildung 6.2 ist eine der einfachsten Formen des Schrittmotors, mit einem zweipoligen Permanentmagneten als Rotor und vier Spulen, zu sehen. Es ist zu sehen, dass an der Spule 3 Strom anliegt, wodurch ein elektrisches Feld erzeugt wird und der Rotor in der gezeigten Stellung fixiert ist. Wird nun, zusätzlich zu Spule 3, auch an Spule 2 Strom angelegt, entsteht auch in dieser Spule ein Magnetfeld und der Rotor dreht sich um 45° im Uhrzeigersinn. Diese Drehung wird auch als Schritt bzw. Vollschritt bezeichnet. Werden nun die Spulen in einer sequenziellen Abfolge magnetisiert, beginnt sich der Rotor zu drehen. Durch das Vorhandensein von vier Spulen in der Abbildung 6.2, ist der gezeigte Schrittmotor in der Lage acht Schritte auszuführen. [25], [26]

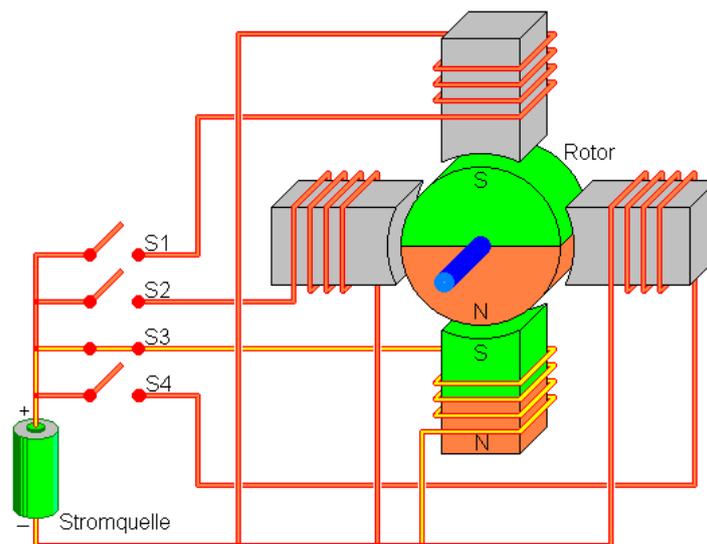


Abbildung 6.2: Funktionsprinzip des Schrittmotors

Je nach Bauart des Schrittmotors, kann eine unterschiedliche Schrittzahl realisiert werden. Die in dieser Arbeit verwendeten Schrittmotoren sind in der Lage 200 Vollschrte auszuführen, wodurch sich Schritte von $1,8^\circ$ ergeben.

Durch die Bewegung von Schrittmotoren in diskreten Schritten, können sehr präzise Positionierungen durchgeführt werden. Des Weiteren verfügen Schrittmotoren über ein hohes Drehmoment bei geringen Geschwindigkeiten, welches ebenfalls einer präzisen Steuerung zugutekommt. Da Schrittmotoren über keine schleifenden Bürsten verfügen, welche verschleifen können, haben diese in der Regel eine hohe Lebensdauer und Zuverlässigkeit. Außerdem ist der Preis gegenüber anderen Elektromotoren gering, was sie für die vorliegende Anwendung ebenfalls attraktiv macht.

Trotz der zuvor erwähnten Vorteile von Schrittmotoren, haben diese auch Nachteile. Durch die Bewegung in diskreten Schritten, kann nur eine begrenzte Drehzahl des Motors erreicht werden. Außerdem entsteht durch die Schritte eine höhere Geräuschentwicklung als bei anderen Elektromotoren und es können Schwingungen entstehen, was in einigen Anwendungen störend sein kann. Bei hoher Last oder einer ungenauen Motorsteuerung, kann es zum Verlust von Schritten kommen, wodurch Ungenauigkeiten entstehen können. Obwohl Schrittmotoren im Vergleich zu anderen Motoren relativ einfach zu steuern sind, erfordern sie dennoch eine genaue Steuerung der Impulse, um eine präzise Bewegung zu gewährleisten. Die Programmierung und Steuerung von Schrittmotoren kann daher etwas komplex sein.

Da in der vorliegenden Anwendung konkrete Winkel angefahren werden, kommt der Nachteil der begrenzten Drehzahl nicht zu tragen. Einerseits ist die theoretisch mögliche Drehzahl immer noch hoch genug für den Anwendungsfall, andererseits, wie in Kapitel 7 noch erwähnt wird, ist die maximale Drehzahl des Schrittmotors nicht der begrenzende Faktor bei der realisierbaren Drehzahl des Motors.

Auch der Nachteil der Schwingungs- und Geräuschentwicklung kann vernachlässigt werden. Zum Zeitpunkt der Druckmessungen befinden sich die Motoren in Ruhe, wodurch eventuell entstehende Schwingungen bei der Bewegung des Motors vernachlässigt werden können. Die Geräuschentwicklung des Schrittmotors ist sehr viel kleiner als die des Freistrahwindkanals und daher irrelevant.

Der Verlust von Schritten kann durch die Verwendung von geschlossenen Regelkreisen (engl. closed loop) minimiert werden und die Motoren präziser gesteuert werden. Dies kann durch die Verwendung eines Encoders oder Sensors realisiert werden, welcher die tatsächliche Position des Rotors misst, und an die Steuerung zurückmeldet, wodurch die verloren gegangenen Schritte ausgeglichen werden

können. Im vorliegenden Anwendungsfall wird ein Schrittmotor mit integriertem Encoder verwendet, um den Verlust von Schritten zu vermeiden.

Durch die Verwendung von sogenannten Schrittmotortreibern, kann die Steuerung der Motoren realisiert werden. Ein Treiber für einen Schrittmotor ist erforderlich, um das Signal des Controllers in eine Energieversorgung für den Schrittmotor umzuwandeln. Der Treiber kann das Signal des Controllers verstärken und die Leistung für den Schrittmotor regulieren, um eine präzise Bewegung des Motors zu ermöglichen. Ohne einen Treiber könnte der Schrittmotor nicht gesteuert werden, da das Signal des Controllers nicht ausreichend Strom liefern würde, um den Motor anzutreiben. Durch die Verwendung von Schrittmotortreibern können auch sogenannte Mikroschritte implementiert werden. Mikroschritte sind kleine Teilbewegungen eines Schrittmotors zwischen den Vollschritten. Im Gegensatz zu Vollschritten, bei denen der Schrittmotor mit einem festen Winkel pro Schritt bewegt wird, bewegt sich der Schrittmotor bei Mikroschritten in kleineren Winkelschritten, die typischerweise ein Vielfaches kleiner als der Vollschritt sind. Dadurch kann die Auflösung des Schrittmotors erhöht werden, was dazu beitragen kann, die Genauigkeit und Präzision der Bewegung zu verbessern.

Die Spezifikationen der in dieser Arbeit verwendeten 17E1K-07 Schrittmotoren sind in Tabelle 6.1 zu sehen. Wie schon erwähnt handelt es sich dabei um einen Schrittmotor mit 200 Schritten pro Umdrehung, was in einem Schrittwinkel von $1,8^\circ$ resultiert. Ein Vollschritt des Motors kann mit einer Genauigkeit von $0,09^\circ$ eingestellt werden. Diese Genauigkeit summiert sich jedoch nicht, eine volle Umdrehung kann also ebenso mit einer Genauigkeit von $360^\circ \pm 0,09^\circ$ eingestellt werden. Durch den integrierten Encoder ist es möglich, das Risiko des Schrittverlusts auf ein Minimum zu reduzieren. [27]

Tabelle 6.1: Spezifikation des 17E1K-07 Schrittmotors [27]

Anzahl der Phasen	2
Nennstrom/Phase	2 A
Haltemoment	72 Ncm
Phasenwiderstand	1,75 Ω
Induktivität	4,0 mH \pm 20%
Rahmengröße	42 \times 42 mm
Körperlänge	60 mm
Schaftdurchmesser	5 mm
Schaftlänge	24 mm
D-Cut Schaftlänge	15 mm
Leitungslänge	270 mm

In Tabelle 6.2 ist die Spezifikation des verwendeten CL42T Closed Loop Schrittmotortreibers zu sehen. Mit diesem ist es möglich bis zu 40 000 Mikroschritte pro Umdrehung durchzuführen, wobei in dieser Arbeit die geringstmögliche Einstellung von 800 Mikroschritten verwendet wird. Daraus resultiert eine Teilschrittgröße von 0,45° mit einer Genauigkeit von $\pm 0,09^\circ$. Der benötigte Strom für die Schrittmotortreiber und die Schrittmotoren wird über ein geeignetes 24 VDC Netzteil, dessen Datenblatt im Anhang B zu finden ist, geliefert.

Tabelle 6.2: Spezifikation des CL42T Schrittmotortreibers [27]

Ausgangsspitzenstrom	0~3 A
Eingangsspannung	24~48 VDC (<i>typical 24 VDC</i>)
Logik Signalstrom	7~16 mA (<i>typical 10mA</i>)
Pulseingangsfrequenz	0~200 kHz
Impulsbreite	2,5 μ s

Für die korrekte Verwendung der Schrittmotoren sind die in Tabelle 6.3 zu sehenden Hinweise zu beachten. Hier wird dargestellt welches Kabel des Schrittmotors mit welcher Buchse des Schrittmotortreibers zu verbinden ist. Eine schematische Darstellung des Schaltplans aller elektrischer Bauteile ist zusätzlich noch in Abbildung 6.3 zu sehen.

Tabelle 6.3: Pinbelegung und Farbe der Kabel für die Schrittmotoren [27]

Bezeichnung am Motortreiber	Farbe des Kabels	Pin am Steckverbinder
A+	Schwarz	1
A-	Grün	2
B+	Rot	3
B-	Blau	4

Um eine korrekte Funktion des Encoders zu gewährleisten, ist die Zuordnung in Tabelle 6.4 zu beachten. Auch hier wird gezeigt welches Kabel des Encoders mit welcher Buchse des Schrittmotortreibers zu verbinden ist. Dies ist auch in Abbildung 6.3 zu sehen, wobei zu beachten ist, dass das weiße Kabel aufgrund der Sichtbarkeit in der Abbildung rosa dargestellt wird.

Tabelle 6.4: Pinbelegung und Farbe der Kabel für die Encoder [27]

Bezeichnung am Motortreiber	Farbe des Kabels	Pin am Steckverbinder
EB+	Gelb	11
EB-	Grün	12
EA+	Schwarz	1
EA-	Blau	13
VCC	Rot	2
EGND	Weiß	3

Neben dem Schrittmotor selbst und dem passenden Schrittmotortreiber, wird noch ein Schrittmotorcontroller benötigt, um eine präzise Steuerung des Motors zu gewährleisten. Der Controller ist dafür zuständig, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und die Verzögerung des Schrittmotors zu steuern. Außerdem ist er dafür zuständig analoge oder andere Signale in digitale Steuersignale umzuwandeln, welche anschließend an den Schrittmotortreiber gesendet werden, um den Motor in Bewegung zu setzen. Ein Schrittmotorcontroller kann als separate Komponente in einem System verwendet werden oder in ein integriertes System eingebettet sein. Einige integrierte Schrittmotorsysteme haben den Controller bereits in den Motor eingebaut, was eine einfachere Verkabelung und Installation ermöglicht.

Als Schrittmotorcontroller wird in der bestehenden Arbeit ein Arduino Uno verwendet. Dies ist ein Mikrocontroller-Board, das auf dem ATmega328P-Chip basiert. Es ist ein

Open-Source-Board, das von der Arduino.cc-Community entwickelt wurde und dazu dient, die Entwicklung von interaktiven elektronischen Projekten zu vereinfachen. Durch das Vorhandensein mehrerer digitaler Ein- und Ausgänge, ist es möglich eine Vielzahl an elektronischen Geräten zu steuern oder mit ihnen zu kommunizieren. Ein Arduino Uno kann mittels einer USB-Verbindung programmiert werden, oder wie in diesem Fall, als serielle Schnittstelle über die USB-Verbindung des Computers fungieren. Mittels der Softwarebibliothek LINX ist es möglich, den Arduino Uno mit der verwendeten Software LabVIEW 2016 zu verbinden. Dabei handelt es sich um eine kostenlose Bibliothek, welche über den NI-Paketmanager heruntergeladen werden kann und wodurch es möglich ist die digitalen Ein- und Ausgänge des Arduino Uno über LabVIEW zu steuern. [28]

In Tabelle 6.5 ist zu sehen, welche Ein- und Ausgänge des Arduino Unos mit welchen Buchsen des Schrittmotortreibers zu verbinden sind. Die Auswahl der Pins für PUL+, DIR+ und ENA+ ist hier beliebig, es ist jedoch darauf zu achten, dass die Pins aus der angeführten Tabelle verwendet werden, da diese Pins auch über das in Kapitel 7 beschriebene LabVIEW Programm angesteuert werden.

Tabelle 6.5: Pinbelegung des Arduinos

	Bezeichnung am Schrittmotortreiber	Verwendeter Pin am Arduino Uno
Gierwinkel	PUL+	8
	PUL-	GND
	DIR+	9
	DIR-	GND
	ENA+	10
	ENA-	GND
Nickwinkel	PUL+	5
	PUL-	GND
	DIR+	6
	DIR-	GND
	ENA+	7
	ENA-	GND

In Abbildung 6.3 ist eine schematische Darstellung des Schaltplans aller elektrischer Bauteile zu sehen. Dies integriert die beiden Schrittmotoren inklusive deren Encoder,

die beiden Schrittmotortreiber und den Arduino Uno. Außerdem ist zu sehen wie jedes der einzelnen Bauteile miteinander verbunden ist.

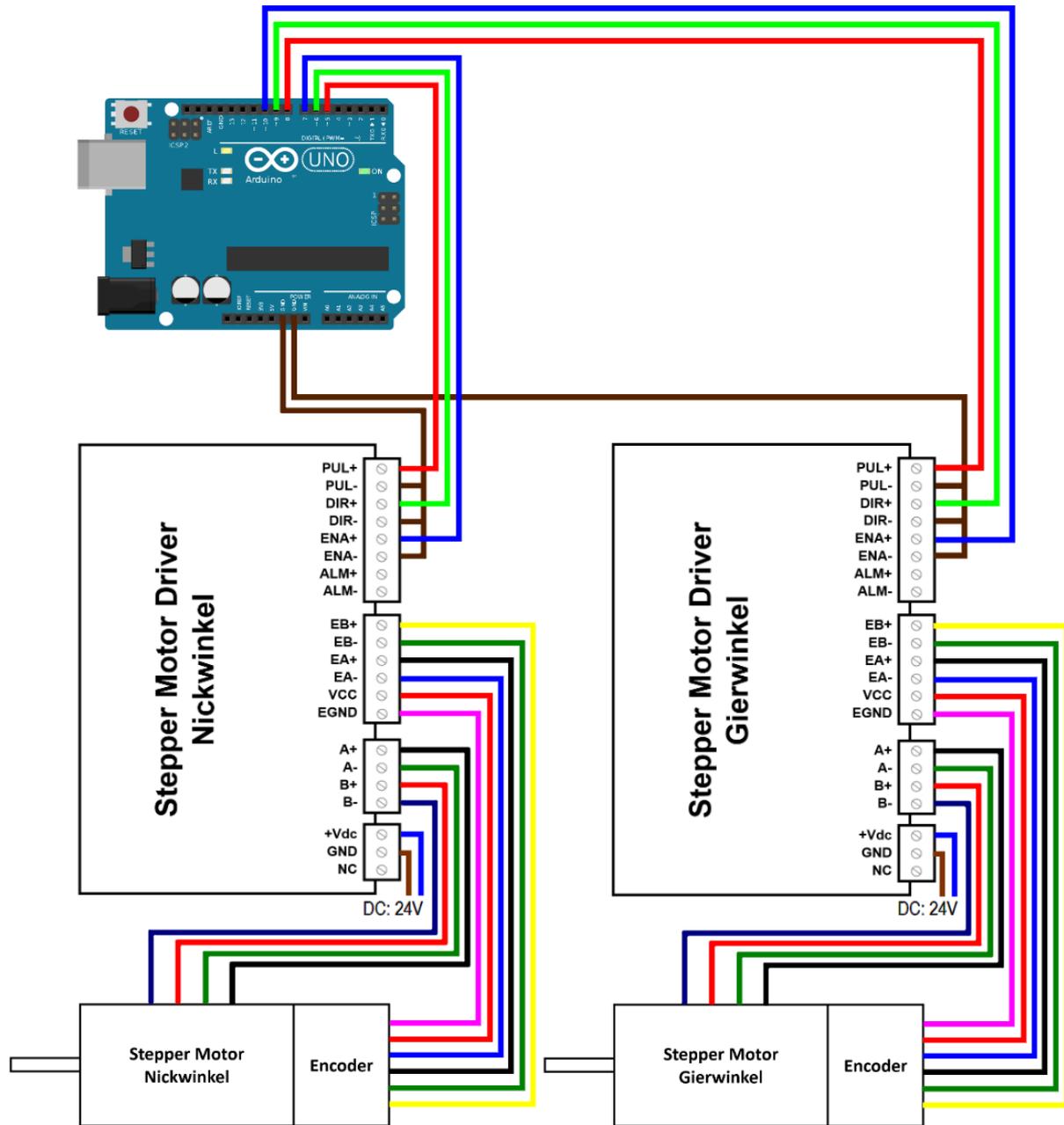


Abbildung 6.3: Schematische Darstellung und Verkabelung der elektrischen Bauteile¹

¹ Die Farben der Kabel zwischen Encoder und Schrittmotortreiber sowie zwischen Schrittmotor und Schrittmotortreiber entsprechen, mit Ausnahme des rosa Kabels, welches in echt weiß ist, den Farben in der schematischen Darstellung. Die Kabel zwischen Schrittmotortreiber und Arduino Uno sind in echt alle schwarz, jedoch ist erkenntlich um welchen Anschluss es sich handelt.

6.2. Mechanische Komponenten

In diesem Kapitel wird die Konstruktion der mechanischen Komponenten für die automatische Verstelleinrichtung beschrieben. Für die Konstruktion wird die Software CATIA V5R21 von Dassault Systemes verwendet.

Die Anforderungen an die mechanischen Bauteile sind die ordnungsgemäße Unterbringung aller elektrischen Bauteile und die Möglichkeit den Abstand x zwischen dem Kopf der Strömungssonde und der Düse des Freistrahwindkanals einzustellen. Weiters soll es möglich sein, den Großteil der Komponenten in der institutseigenen Werkstatt zu fertigen. Die gesamte Konstruktion ist in Abbildung 6.4 zu sehen und kann grob in drei Teile unterteilt werden. Diese sind die Verstelleinrichtung für den Gierwinkel, die Verstelleinrichtung für den Nickwinkel und die Profilverrichtung, an der die beiden Verstelleinrichtungen und der Rest der elektrischen Bauteile montiert sind. Außerdem ist es möglich den Abstand zwischen Düse und Sondenkopf über die Profilverrichtung einzustellen. Auf die drei Teile der Gesamtkonstruktion wird in den nächsten Unterkapiteln genauer eingegangen. Die Zeichnungsableitungen aller konstruierter Teile sind im Anhang C zu finden.

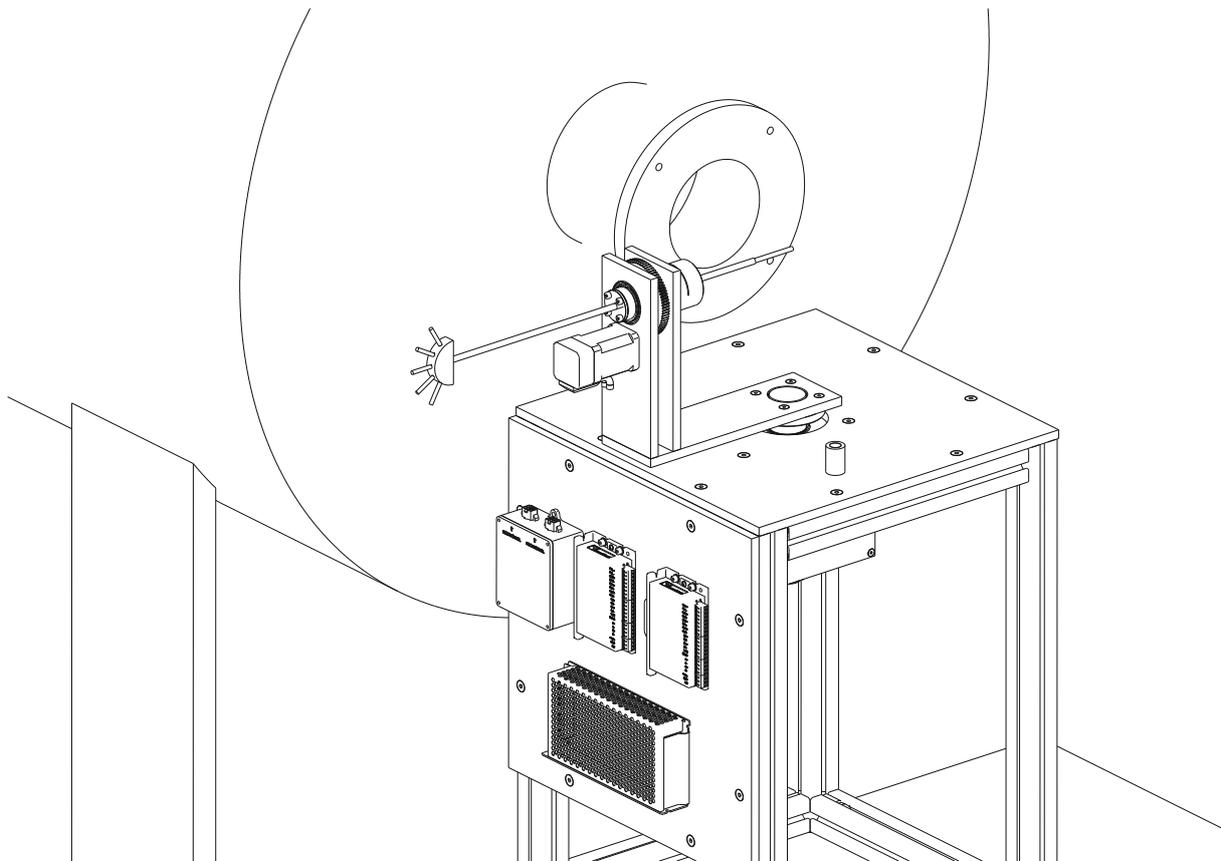


Abbildung 6.4: Übersicht der mechanischen Komponenten

6.2.1. Verstelleinrichtung für den Gierwinkel

Die Verstelleinrichtung für den Gierwinkel ist in Abbildung 6.5 zu sehen. Der Hauptbestandteil der Vorrichtung ist die Hohlwelle mit integrierter Klemmfunktion. Die Strömungssonde wird durch die Welle geschoben und kann auf der Düsenseite festgeklemmt werden. Dafür werden 2 Klemmstücke verwendet die zusammengepresst werden können. Um alle am Institut verfügbaren Sonden aufnehmen zu können, gibt es diese Klemmstücke, je nach Sondendurchmesser, welche in Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2 zu sehen sind, in drei unterschiedlichen Varianten. Auf der anderen Seite der Welle kann eine Führung für die Sonde montiert werden. Diese Führung ist ebenfalls in drei Varianten mit unterschiedlichem Innendurchmesser vorhanden.

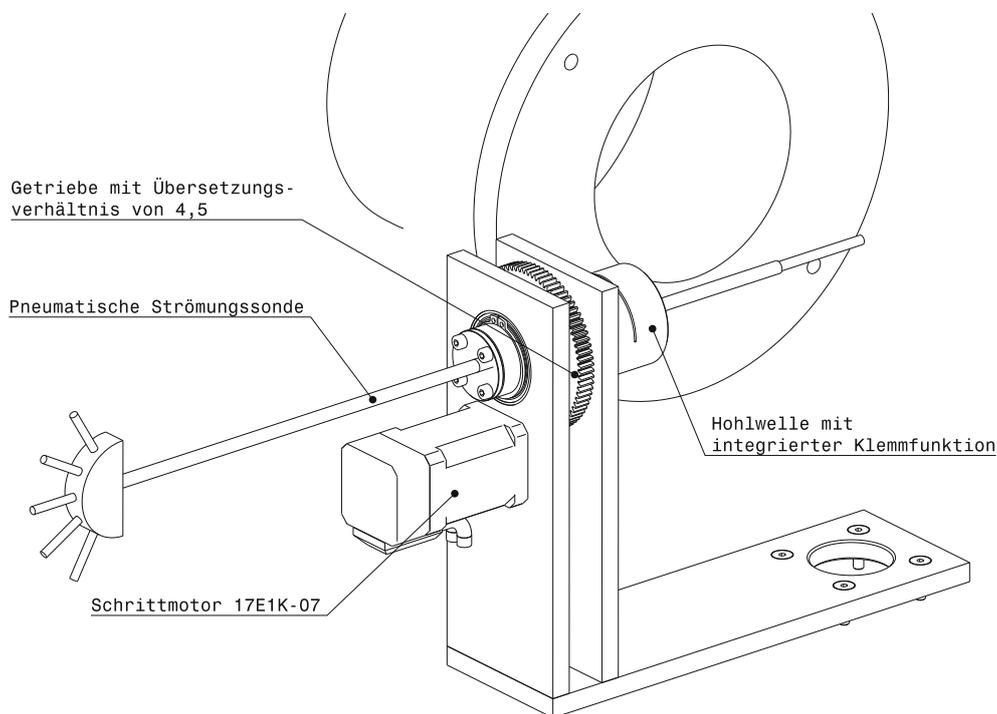


Abbildung 6.5: Vorrichtung zur Verstellung des Gierwinkels

Wie schon in Kapitel 6.1 erwähnt, kann der Schrittmotor 800 Teilschritte zu je $0,45^\circ$ ausführen. Die Kalibrierung der Strömungssonden in dieser Diplomarbeit erfolgt jedoch, wie schon in Kapitel 4.4 erwähnt, in Schritten von 5° . Um dies bewerkstelligen zu können wird ein Getriebe, bestehend aus einer Stirnradstufe, mit einem Übersetzungsverhältnis von 4,5 verbaut, welches die Drehbewegung des Schrittmotors auf die Hohlwelle und somit die Strömungssonde überträgt. Durch das Getriebe kann der Gierwinkel $\Delta\beta$ der Sonde in Schritten von $0,1^\circ$ eingestellt werden. Die Genauigkeit der Winkeleinstellung verbessert sich dadurch auf $\pm 0,02^\circ$. Wie schon erwähnt wird diese Genauigkeit nicht mit der Schrittzahl aufsummiert. Das Ausführen von 50 Teilschritten des Schrittmotors führt zu einer Änderung im Gierwinkel von $5^\circ \pm 0,02^\circ$. Durch Einstellung der Mikroschrittzahl am Schrittmotor-

treiber ist es möglich die Auflösung noch genauer als $0,1^\circ$ zu machen. Dies ist jedoch für den vorliegenden Anwendungsfall nicht nötig.

Die Hohlwelle ist mittels zwei Rillenkugellagern 61807-2RS1 von SKF drehbar im Gehäuse gelagert. Das Gehäuse besteht aus drei 10mm starken Platten, welche miteinander verschraubt sind. An diesem wird auch der Schrittmotor angeschraubt. Die Befestigungsbohrungen des Schrittmotors sind mit einem Spiel versehen, damit das Flankenspiel der Stirnradstufe komplett ausgeglichen werden kann.

Die Vorrichtung für den Gierwinkel wird über vier Schrauben mit der im kommenden Kapitel beschriebenen Verstelleinrichtung für den Nickwinkel verschraubt, damit auch der Nickwinkel $\Delta\gamma$ der Strömungssonde einstellbar ist. Eine komplette Stückliste der Verstelleinrichtung für den Gierwinkel ist in Tabelle 6.6 zu sehen.

Tabelle 6.6: Stückliste für die Verstelleinrichtung für den Gierwinkel

Bezeichnung	Stückzahl	Zeichnungsnummer	Norm/Hersteller
Drehplatte	1	008	-
Innenplatte	1	009	-
Außenplatte	1	010	-
Vollmond D6	1	005	-
Vollmond D6,35	1	006	-
Vollmond D7	1	007	-
Welle oben	1	015	-
Klemmstück D6	2	018	-
Klemmstück D6,35	2	019	-
Klemmstück D7	2	020	-
Distanzscheibe 4mm	2	003	-
Rillenkugellager 61807-2RS1	2	-	SKF
Passfeder 8x16	1	-	DIN 6885
Sicherungsring 35	1	-	DIN 471
Ritzel	1	021	igus
Zahnrad	1	022	igus

Schrittmotor 17E1K-07	1	-	Stepperonline
Zylinderschraube M5x20	1	-	DIN 912
Zylinderschraube M4x20	4	-	DIN 912
Sechskantschraube M3x14	4	-	DIN 933
Senkschraube M5x20	4	-	ISO 10642
Senkschraube M4x20	4	-	ISO 10642
Gewindestift M3x5	1	-	DIN 913
Zylinderstift 3x12	4	-	DIN 6325

6.2.2. Verstelleinrichtung für den Nickwinkel

In Abbildung 6.6 ist die Verstelleinrichtung für den Nickwinkel $\Delta\gamma$ zu sehen. Diese besteht wieder zum Großteil aus 10mm starken Platten, die miteinander verschraubt werden.

In dieser Vorrichtung wird dasselbe Getriebe, mit einer Übersetzung von 4,5, verwendet, welches auch bei der Vorrichtung für den Gierwinkel zum Einsatz kommt. Dadurch ist es möglich den Nickwinkel in $0,1^\circ$ Schritten mit einer Genauigkeit von $\pm 0,02^\circ$ einzustellen. Über das Getriebe wird die Drehbewegung auf die mit zwei 61807-2RS1 Rillenkugellagern drehbar gelagerte Welle übertragen. An dieser Welle kann die Verstelleinrichtung für den Gierwinkel montiert werden.

Um Beschädigungen an den Strömungssonden oder den Motorkabeln zu vermeiden, sind mechanische Anschläge integriert, die den möglichen Nickwinkelbereich auf $\pm 50^\circ$ einschränken.

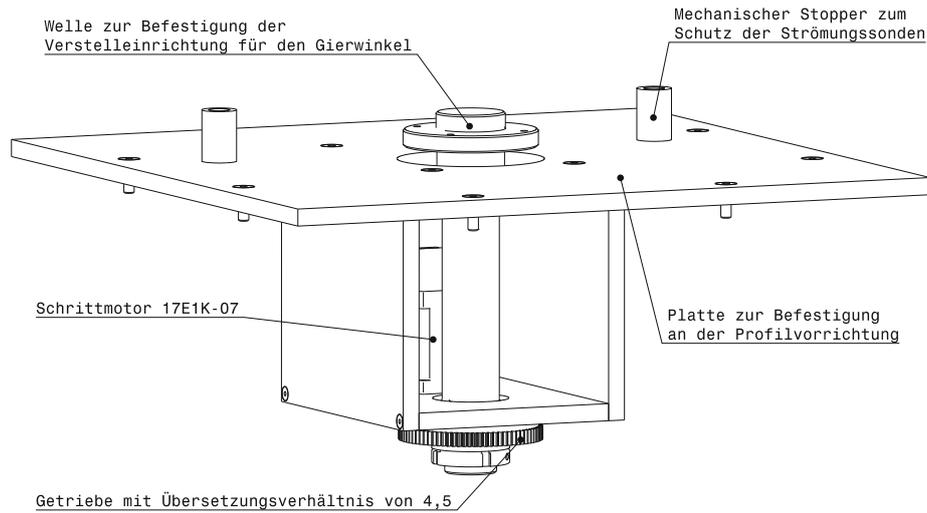


Abbildung 6.6: Vorrichtung zur Verstellung des Nickwinkels

In Tabelle 6.7 ist eine Stückliste, aller für die Verstelleinrichtung für den Nickwinkel vorkommender Bauteile zu sehen.

Tabelle 6.7: Stückliste für die Verstelleinrichtung für den Nickwinkel

Bezeichnung	Stückzahl	Zeichnungsnummer	Norm/Hersteller
Basisplatte	1	014	-
Bodenplatte	1	011	-
Seitenplatte	2	013	-
Deckelplatte	1	012	-
Welle unten	1	016	-
Distanzscheibe 1mm	1	004	-
Stopper	1	002	-
Gummipuffer	1	001	-
Rillenkugellager 61807-2RS1	2	-	SKF
Passfeder 8x16	1	-	DIN 6885
Wellenmutter KMK6	1	-	SKF
Ritzel	1	021	igus
Zahnrad	1	022	igus
Schrittmotor 17E1K-07	1	-	Stepperonline

Senkschraube M6x20	14	-	ISO 10642
Senkschraube M4x20	8	-	ISO 10642
Sechskantschraube M3x14	4	-	DIN 933
Zylinderstift 3x12	8	-	DIN 6325
Gewindestift M3x5	1	-	DIN 913

6.2.3. Profilverrichtung

Die Profilverrichtung, zu sehen in Abbildung 6.7, dient der Unterbringung aller übrig gebliebenen elektrischen Bauteile und der Befestigung der Verstelleinrichtung für den Nickwinkel. Außerdem ist diese an einem beweglichen Unterbau befestigt, welcher höhenverstellbar ist. Dadurch ist es möglich den Abstand zwischen der Düse des Windkanals und des Kopfes der Strömungssonde einzustellen. Durch den neuen Unterbau ist auch die Verstelleinrichtung nicht mehr direkt mit dem Freistrahwindkanal verschraubt, wodurch Schwingungen der Sonde minimiert werden können.

Die Vorrichtung besteht aus $40 \times 40\text{mm}$ Konstruktionsprofilen von ITEM, die miteinander verschraubt werden. An der seitlichen Platte werden das Netzteil, die beiden Schrittmotortreiber und der Arduino Uno inklusive Gehäuse montiert.

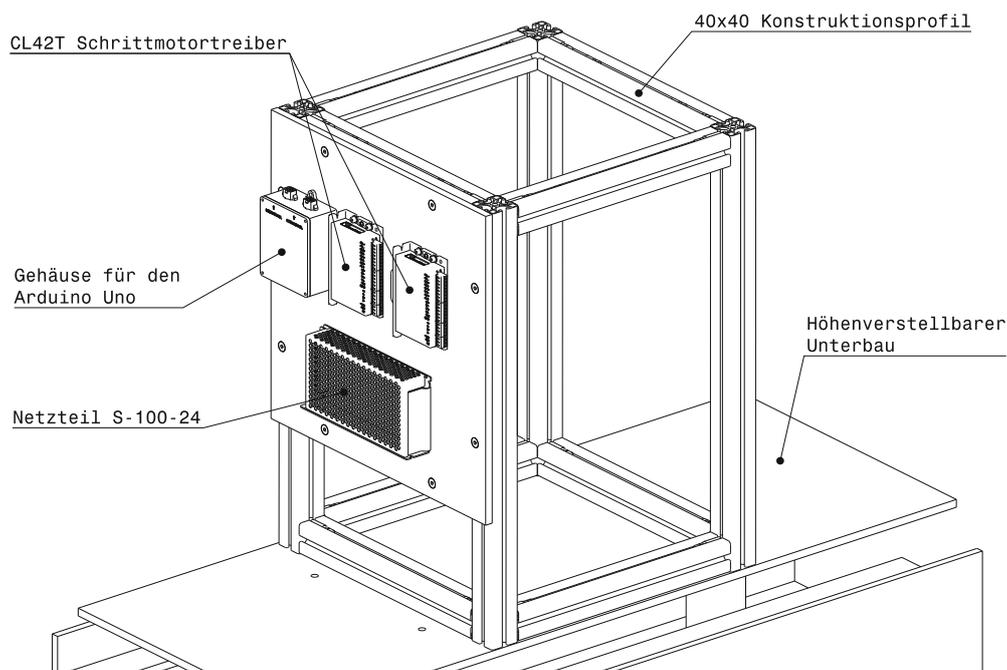


Abbildung 6.7: Konstruktion der Profilverrichtung

Eine komplette Stückliste der Profilverrichtung ist in Tabelle 6.8 zu sehen.

Tabelle 6.8: Stückliste für die Profilverrichtung

Bezeichnung	Stückzahl	Zeichnungsnummer	Norm/Hersteller
Konstruktionsprofil 40x40x320	9	-	item
Konstruktionsprofil 40x40x565	4	-	item
Nutenstein V8 M6	16	-	item
Verbindungssatz 8 40	18	-	item
Controllerplatte	1	017	-
Senkschraube M6x20	8	-	ISO 10642
CL42T Schritt- motortreiber	2	-	Stepperonline
Netzteil S-100-24	1	-	Stepperonline
Arduino Uno inkl. Gehäuse	1	-	Arduino
Zylinderschraube M4x20	10	-	DIN 912
Sechskantmutter M4	10	-	DIN 934
Sechskantschraube M3x14	4	-	DIN 933

7. Integration der Steuerung in LabVIEW

Wie schon in Kapitel 6.1 erwähnt, erfolgt die Ansteuerung des Arduino Uno über das Software Toolkit LINX [29] (Hobbyist Toolkit in neueren LabVIEW Versionen), welches kostenlos über den NI-Paketmanager heruntergeladen werden kann. Nach der erfolgreichen Installation von LINX auf dem PC, muss auch der Arduino Uno für die Kommunikation mit LabVIEW vorbereitet werden. Die dafür nötige Software wird, nach Verbindung über den USB-Anschluss, in LabVIEW unter Tools>LINX>Firmware Wizard... installiert.

Die Steuerung der Schrittmotoren wird mit drei separaten LabVIEW Programmen umgesetzt. Mit dem ersten ist es möglich den Gierwinkel $\Delta\beta$ und den Nickwinkel $\Delta\gamma$ der Strömungssonden in Schritten von $0,1^\circ$ zu verstellen. Das zweite LabVIEW Programm ist für die Kalibrierung von Dreilochsonden zuständig und mit dem dritten können Fünflochsonden kalibriert werden.

7.1. LabVIEW Programm für die Sondenverstellung

In diesem Kapitel wird das LabVIEW Programm, auch Virtual Instrument (VI) genannt, für die Winkelverstellung der Sonden erklärt. Ein VI besteht immer aus zwei Teilen, dem Graphic User Interface (GUI), welches der Anwender sieht und für den Fall der Sondenverstellung in Abbildung 7.1 zu sehen ist, und dem zugehörigen Blockdiagramm, welches für die Ausführung des VIs zuständig ist und in Abbildung 7.2 zu sehen ist. Das Erstellen eines Funktionsfeldes im GUI erzeugt immer einen zugehörigen Block im Blockdiagramm, welcher die gewünschte Funktion ausführt. [30]

In Abbildung 7.1 sind die beiden Tabs Sondenverstellung und Einstellungen zu sehen. Im Tab Einstellungen kann die initiale Konfiguration des VIs festgelegt werden. Diese umfasst die Angabe des COM-Ports, mit dem der Arduino verbunden ist, die Anzahl der Mikroschritte (Pulse) pro Umdrehung, die Getriebeübersetzung und die Zeitverzögerung, die zwischen zwei Mikroschritten gewartet werden soll in der Einheit *ms*. Durch diese Zeitverzögerung kann die Drehzahl des Schrittmotors reguliert werden. Die maximale erreichbare Drehzahl der Motoren ist von der Schreibgeschwindigkeit von LabVIEW, der Schreibgeschwindigkeit des Arduinos und des mechanischen Widerstandes der Vorrichtung abhängig. Die aus empirischen Versuchen ermittelte maximale Drehzahl ergibt sich zu $3,98 \text{ U/min}$. Aus dieser Drehzahl ergibt sich eine Dauer von $15,08 \text{ s}$ pro Umdrehung des Schrittmotors. Die Konfiguration sollte einmalig eingestellt werden und anschließend im Betrieb nicht mehr geändert werden.

Über den Tab Sondenverstellung erfolgt der eigentliche Betrieb des VIs. Es sind zwei Eingabefelder vorhanden, eines für den Gierwinkel $\Delta\beta$ und eines für den Nickwinkel $\Delta\gamma$. Durch Eingabe des gewünschten Winkels und anschließendem Drücken des Knopfes *positiv* oder *negativ* wird der Winkel der Sonde in die positive oder negative Richtung verstellt. Hier ist die festgelegte Vorzeichenkonvention der Winkel aus Abbildung 2.6 zu beachten. Über das Anzeigefeld Counter wird dem Benutzer eine visuelle Rückmeldung gegeben, um wie viel Grad die Sonde seit Start des VIs verstellt wurde.

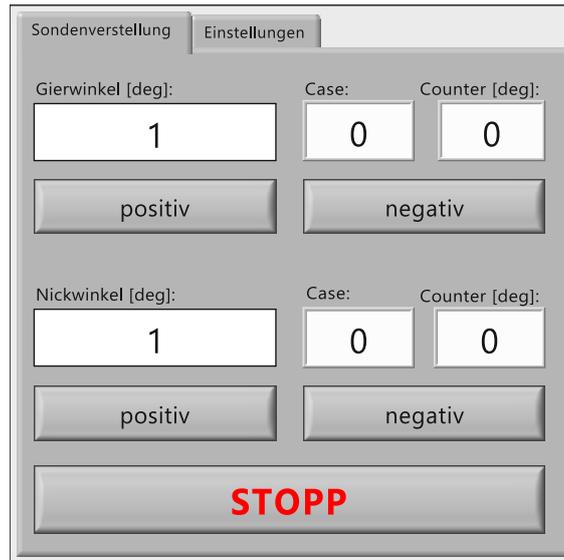


Abbildung 7.1: GUI der Sondenverstellung

Zu Beginn des Blockdiagrammes in Abbildung 7.2 wird die serielle Schnittstelle zum Arduino Uno hergestellt. Über die beiden Pins 7 und 10 des Arduinos werden die beiden Schrittmotoren aktiviert. Anschließend startet eine *while*-Schleife in der die Sondenverstellung stattfindet. Durch eine *case-structure*, zu vergleichen mit einer *if-else*-Funktion, wird festgelegt welcher der beiden Motoren in welche Richtung verstellt wird. Die möglichen Cases und deren Funktion sind in Tabelle 7.1 zu sehen. Durch Drücken des Knopfes *positiv* für den Gierwinkel wird beispielsweise Case 1 aktiviert und die Sonde um den gewünschten Winkel verstellt. Für jeden Teilschritt des Motors wird durch Pin 6 (Pin 9 für den Nickwinkel) die Drehrichtung des Motors festgelegt und anschließend durch Pin 5 (Pin 8 für den Nickwinkel) der Teilschritt ausgeführt. Dieser Vorgang wird durch eine *for*-Schleife so lange wiederholt, bis der gewünschte Verstellwinkel erreicht ist. Durch Drücken des Knopfes *STOPP* wird die *while*-Schleife beendet, die serielle Schnittstelle zum Arduino geschlossen und das VI für die Sondenverstellung beendet. Vor der Kalibrierung einer pneumatischen Strömungs-sonde muss immer dieses Programm ausgeführt werden und die Sonde auf 0° Gierwinkel und 0° Nickwinkel ausgerichtet werden.

Tabelle 7.1: Funktionen der Cases im Blockdiagramm für die Sondenverstellung

Case	Funktion
0	keine Verstellung der Sonde
1	Bewegung der Sonde um positives $\Delta\beta$
2	Bewegung der Sonde um negatives $\Delta\beta$
4	Bewegung der Sonde um positives $\Delta\gamma$
8	Bewegung der Sonde um negatives $\Delta\gamma$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

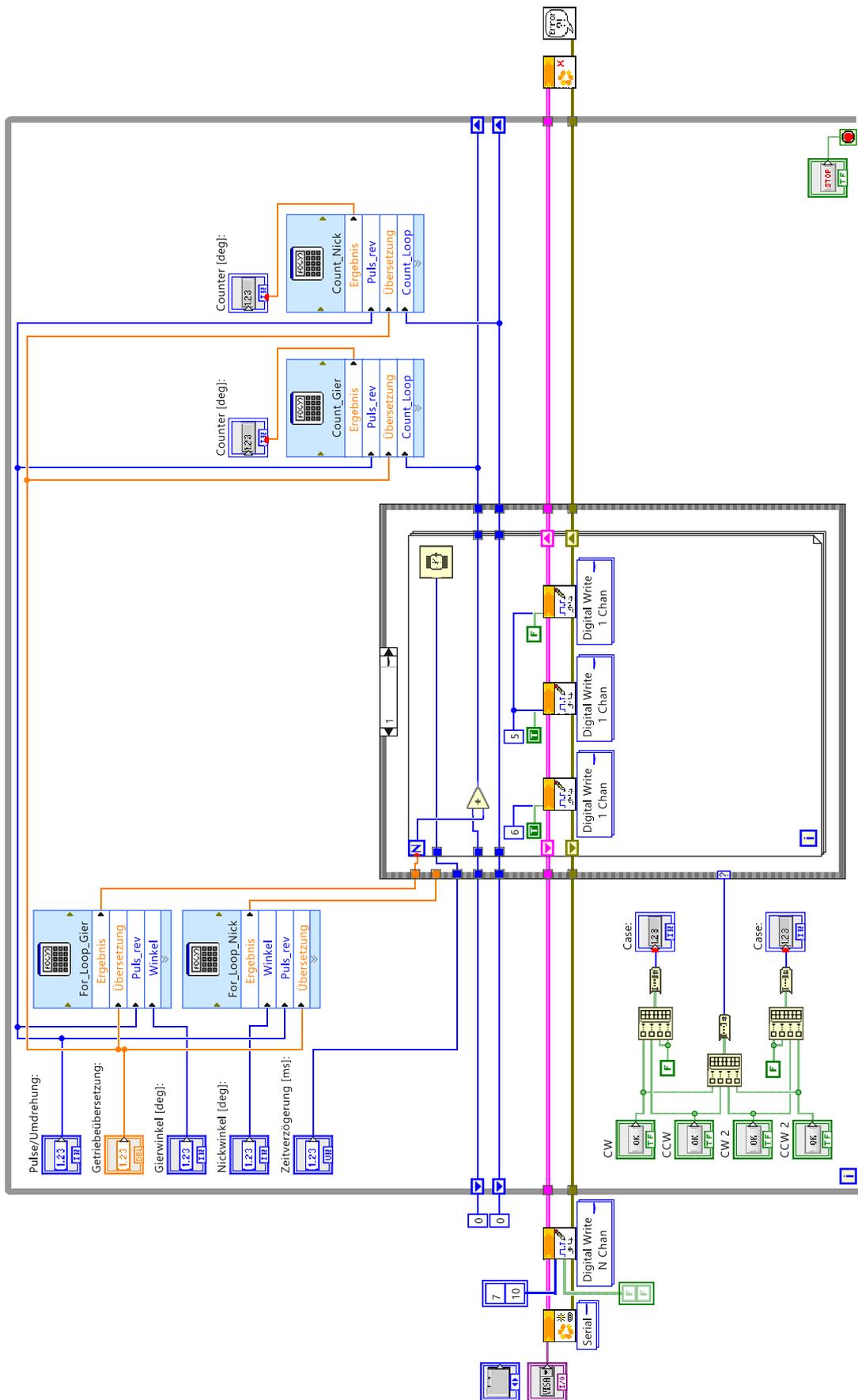


Abbildung 7.2: Blockdiagramm der Sondenverstellung

7.2. LabVIEW Programm für die Kalibrierung von Dreilochsonden

In diesem Kapitel wird das VI für die Kalibrierung von Dreilochsonden besprochen. Dieses besteht aus dem GUI in Abbildung 7.3 und dem zugehörigen Blockdiagramm in Abbildung 7.4. Da bei jedem eingestellten Gierwinkel $\Delta\beta$ die Drücke der Dreilochsonde gemessen werden müssen, wird das bestehende VI der Druckmessung als subVI eingebunden.

Auf der linken Seite im GUI sind die zwei Tabs Kalibrierparameter und Einstellungen zu sehen. Die Einstellungen umfassen die Angabe des COM-Ports, mit dem der Arduino verbunden ist, die Anzahl der Mikroschritte (Pulse) pro Umdrehung und die Getriebeübersetzung. Diese sind eine initiale Konfiguration und sollten im Betrieb nicht geändert werden. Im Tab Kalibrierparameter kann der gewünschte Winkelbereich des Gierwinkels für die Kalibrierung und die Anzahl der Kalibrierpunkte, welche gleichmäßig auf den Winkelbereich aufgeteilt werden, eingestellt werden. Die in Abbildung 7.3 zu sehenden Werte von $\pm 30^\circ$ für den Winkelbereich und 13 Kalibrierpunkte resultieren in Schritten von 5° und werden für alle in dieser Diplomarbeit kalibrierten Dreilochsonden verwendet. Durch die implementierte Einstellung des Nickwinkels ist es möglich die Dreilochsonden auf ihren Nickwinkeleinfluss zu untersuchen. Dieser wurde schon im Rahmen einer Diplomarbeit von Schrempf [5] für die SVUSS/3 Kobrasonde, die AVA Trapezsonde Nr. 110 und die AVA Zylindersonde Nr. 43 untersucht.

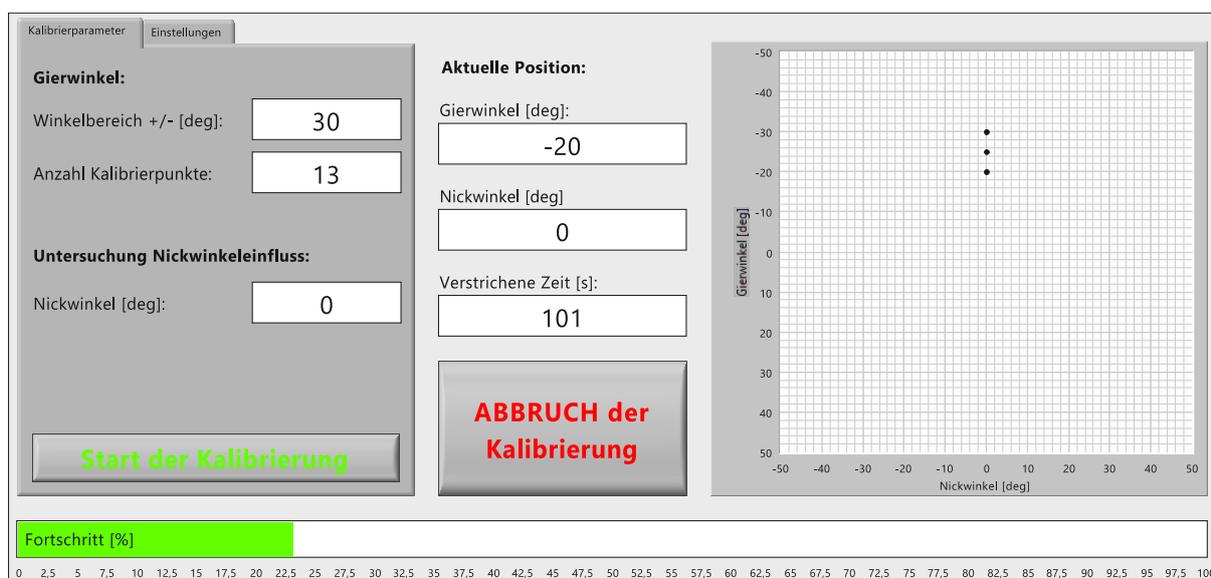


Abbildung 7.3: GUI der Kalibrierung von Dreilochsonden

Im Rest des GUI in Abbildung 7.3 wird möglichst viel visuelles Feedback für den Anwender gezeigt. Dies umfasst die aktuelle Position der Dreilochsonde, angezeigt in

Gierwinkel und Nickwinkel. Des Weiteren wird die verstrichene Zeit seit Beginn der Kalibrierung angezeigt. Im Diagramm auf der rechten Seite wird für jede erfolgreich kalibrierte Position ein schwarzer Punkt beim entsprechenden Gier- und Nickwinkel gemacht. Das Diagramm dient als Projektion der Kalibrierpunkte auf die Frontalansicht der Düse des Freistrahwindkanals. Schlussendlich wird auf der unteren Seite der Fortschritt der Kalibrierung mittels eines grünen Balkens in Prozent angezeigt.

Zu Beginn des Blockdiagrammes in Abbildung 7.4 wird die serielle Schnittstelle zum Arduino hergestellt und die beiden Schrittmotoren über die Pins 7 und 10 aktiviert. Anschließend wird eine while-Schleife geöffnet in der die Kalibrierparameter eingegeben werden können. Durch Drücken des Knopfes Start der Kalibrierung wird die while-Schleife geschlossen und die Kalibrierung beginnt. Danach wird über Pin 6 die Richtung des Schrittmotors eingestellt und mittels Pin 5 die Sonde in die Startstellung gebracht. In der darauffolgenden case-structure wird der gewünschte Nickwinkel eingestellt. In Tabelle 7.2 sind die möglichen Cases und deren Funktion zu sehen.

Tabelle 7.2: Funktionen der Cases im Blockdiagramm für die Kalibrierung von Dreilochsonden

Case	Funktion
0	Nickwinkel bleibt auf 0°
1	positive Verstellung des Nickwinkels
2	negative Verstellung des Nickwinkels

Anschließend erfolgt die Schrittweise Verstellung des Gierwinkels mit Hilfe von zwei for-Schleifen. Die innere der beiden wird so oft durchlaufen, dass der gewünschte Schrittwinkel erreicht wird. Die äußere for-Schleife wird entsprechend der Anzahl der Kalibrierpunkte wiederholt, damit der komplette Kalibrierbereich abgedeckt ist. Bei jedem Kalibrierpunkt wird das bestehende Programm "sonden3_LabVIEW_2016.vi" als subVI aufgerufen und die aufgenommenen Messwerte in einer DAT-Datei abgespeichert. Die Form der Ausgabedatei ist in Tabelle 7.3 zu sehen. Diese umfasst die gemessene Temperatur, sowie die Mittelwerte und Standardabweichungen der gemessenen Druckdifferenzen. Diese werden jeweils aus 30 Messwerten berechnet.

Tabelle 7.3: Form der Ausgabedatei der Kalibrierung einer Dreilochsonde

T [°C]	MW $p_t - p_u$	MW $p_1 - p_u$	MW $p_2 - p_u$	MW $p_3 - p_u$	STABW $p_t - p_u$	STABW $p_1 - p_u$	STABW $p_2 - p_u$	STABW $p_3 - p_u$
22,4	1549,5	1056,6	-511,8	1336,1	14,9	16,5	17,9	22,5
22,4	1553,0	1185,7	-328,0	1225,9	13,8	15,1	7,4	13,0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
22,8	1541,9	1202,7	1368,7	-678,5	14,5	10,9	14,8	21,8

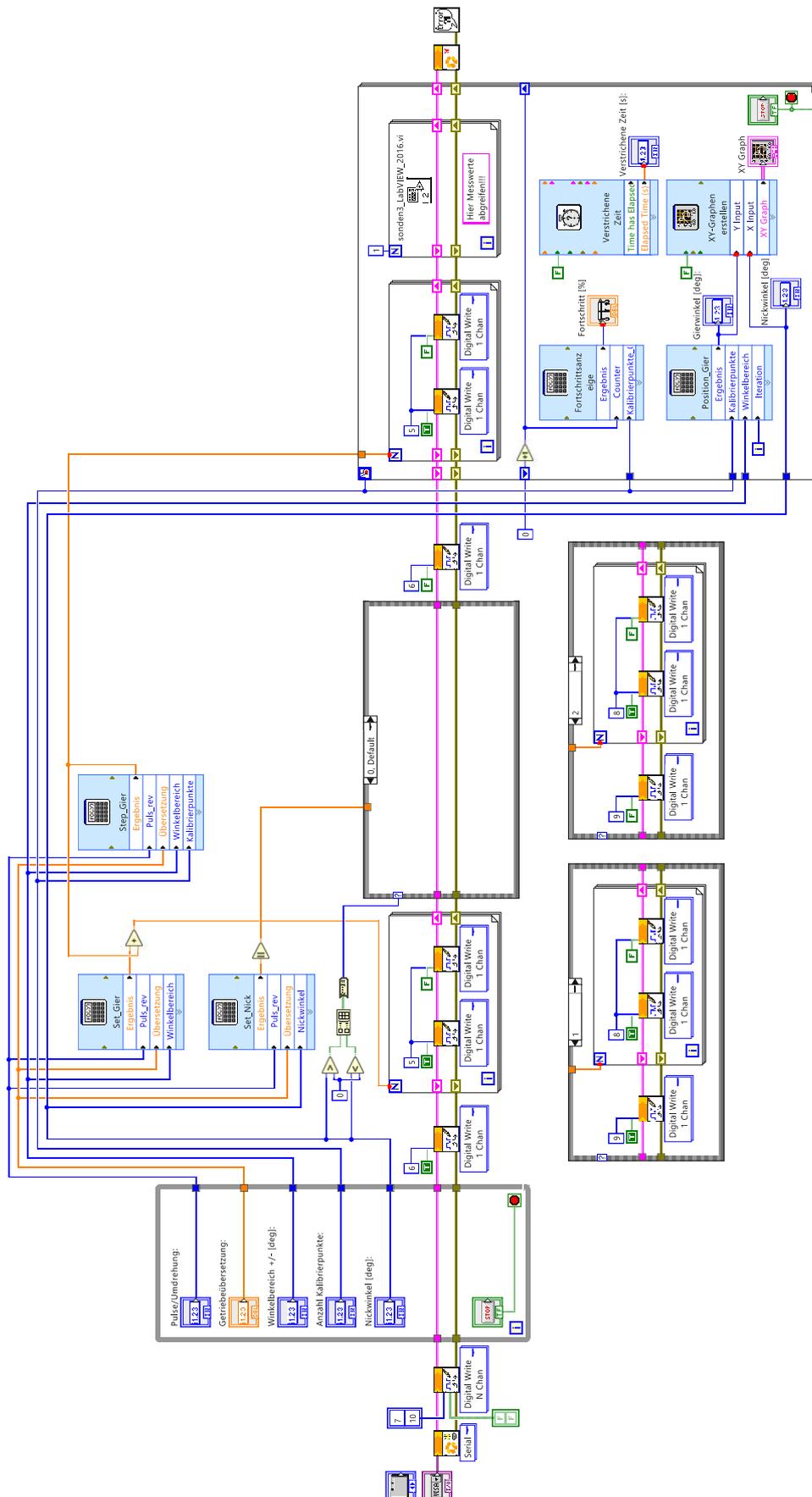


Abbildung 7.4: Blockdiagramm der Kalibrierung von Dreilochsonden

7.3. LabVIEW Programm für die Kalibrierung von Fünflochsonden

Das LabVIEW Programm für die Fünflochsonde ist eine Erweiterung aus dem VI der Dreilochsonde. Das GUI des VIs ist in Abbildung 7.5 zu sehen, das zugehörige Blockdiagramm in Abbildung 7.6.

Auf der linken Seite sind wieder die Tabs Kalibrierparameter und Einstellungen zu sehen. Unter Einstellungen sind dieselben Eingaben zu finden wie bei der Dreilochsonde. Im Tab Kalibrierparameter sind die Eingaben für den gewünschten Winkelbereich und die Anzahl der Kalibrierpunkte für Gier- und Nickwinkel zu finden. Diese Einstellungen werden im Normalfall für beide Winkel gleich gewählt und in dieser Diplomarbeit werden die zu sehenden Werte von $\pm 30^\circ$ für den Winkelbereich, aufgeteilt auf je 13 Kalibrierpunkte verwendet. Daraus ergibt sich eine Gesamtzahl von 169 Kalibrierpunkten.

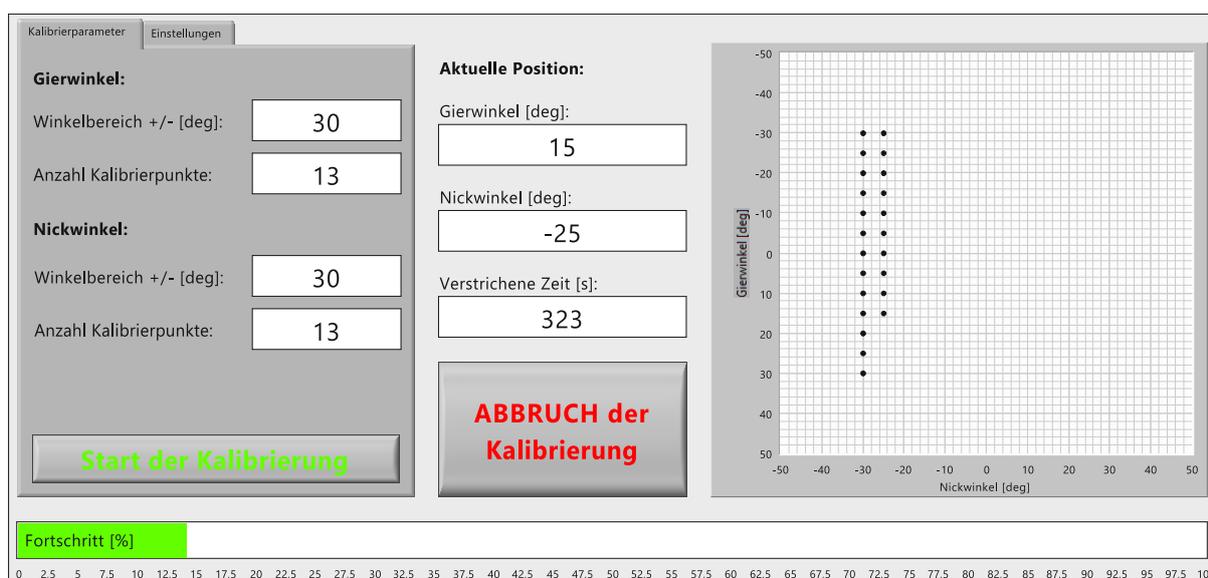


Abbildung 7.5: GUI der Kalibrierung von Fünflochsonden

Da die Kalibrierung einer Fünflochsonde deutlich mehr Zeit in Anspruch nimmt als die der Dreilochsonde, ist die Visualisierung des aktuellen Standes hier sehr wichtig. In der Mitte von Abbildung 7.5 wird die aktuelle Position des Gier- und Nickwinkels, sowie die bisher verstrichene Zeit angezeigt. Im Diagramm auf der rechten Seite werden die erfolgreich kalibrierten Positionen mit einem schwarzen Punkt gekennzeichnet und mit Hilfe des grünen Balkens auf der Unterseite der Fortschritt der Kalibrierung in Prozent angezeigt.

Im Blockdiagramm in Abbildung 7.6 wird wie schon zuvor zu Beginn die serielle Schnittstelle zum Arduino hergestellt und die beiden Schrittmotoren aktiviert. In der

darauffolgenden while-Schleife können die Kalibrierparameter eingetragen werden. Durch Drücken des Knopfes Start der Kalibrierung wird die Schleife verlassen und die beiden Motoren fahren in ihre Ausgangsposition. Die beiden for-Schleifen zur Verstellung des Gierwinkels sind hier um drei weitere for-Schleifen erweitert, welche den Gierwinkel auf die Ausgangsposition zurückstellt, den Schrittwinkel des Nickwinkels einstellt und den gesamten Prozess um die Anzahl der Kalibrierpunkte wiederholt. Mit dem Knopf ABBRUCH der Kalibrierung in Abbildung 7.5 kann notfalls die for-Schleife verlassen werden, um eventuell auftretende Kollisionen zu verhindern.

Die Druckmessung der Fünflochsonde erfolgt über das bestehende LabVIEW Programm “sonden5_LabVIEW_2016.vi“ und wird als subVI am Ende des Blockdiagramms für jeden Kalibrierpunkt aufgerufen. Die gemessene Temperatur und die Mittelwerte und Standardabweichung der Druckdifferenzen, welche aus je 30 Messwerten ermittelt werden, werden als DAT-Datei abgespeichert. Die Form der Ausgabedatei ist in Tabelle 7.4 zu sehen. Für jede erfolgreich kalibrierte Position der Sonde wird eine Zeile in der Ausgabedatei hinzugefügt. Daraus ergeben sich bei den in dieser Diplomarbeit kalibrierten Fünflochsonde 169 Zeilen in der Ausgabedatei.

Tabelle 7.4: Form der Ausgabedatei der Kalibrierung einer Fünflochsonde

$T [^{\circ}C]$	MW $p_t - p_u$	MW $p_1 - p_u$...	MW $p_5 - p_u$	STABW $p_t - p_u$	STABW $p_1 - p_u$...	STABW $p_5 - p_u$
18,9	663,3	243,7	...	572,2	21,0	13,8	...	12,0
18,7	662,2	287,2	...	565,9	23,9	22,2	...	14,4
.
.
20,6	647,3	209,3	...	-564,7	18,5	19,8	...	21,8

7.4. Ablauf der Kalibrierung einer pneumatischen Strömungssonde

Zunächst wird die zu kalibrierende Strömungssonde in der Verstelleinrichtung montiert und die Druckschläuche angeschlossen. Hier ist darauf zu achten, je nach Schaftdurchmesser der Strömungssonde (siehe Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2) die passenden Klemmstücke und die passende Führung zu wählen.

Nachdem die Sonde montiert wurde, wird sie mittels der Datei "Sondenverstellung.vi", welche in Kapitel 7.1 beschrieben ist, so eingerichtet, dass der Gierwinkel $\Delta\beta$ und der Nickwinkel $\Delta\gamma$ jeweils 0° sind. Zum Einstellen des Gierwinkels wird eine Wasserwaage zur Hilfe genommen. Je nach Strömungssonde ist es danach notwendig die Sonde um 90° zu drehen. Der Abstand zwischen Düse und Sondenkopf wird über den Unterbau eingestellt und mit einem Maßband überprüft.

Der Umgebungsdruck und die Umgebungstemperatur wird mittels eines Druckmessgeräts gemessen und notiert. Diese werden für die anschließende Auswertung der Messergebnisse benötigt.

Nun wird das Radialgebläse des Freistrahwindkanals hochgefahren und auf die gewünschte Drehzahl eingestellt. Nach Erreichen der gewünschten Drehzahl wird gewartet, bis sich eine stationäre Strömung ausgebildet hat. Dies wird mittels des im Windkanal verbauten Pt-100 Widerstandsthermometers überprüft. Die gemessene Temperatur sollte sich nicht mehr ändern.

Je nach Art der Strömungssonde werden die benötigten LabVIEW Programme geöffnet. Dies sind bei der Kalibrierung einer Dreilochsonde die Programme "Kalibrierung_Dreilochsonde.vi", welches in Kapitel 7.2 beschrieben wird, und "sonden3_LabVIEW_2016.vi", für die Kalibrierung einer Fünflochsonde die Programme "Kalibrierung_Fünflochsonde.vi", beschrieben in Kapitel 7.3, und "sonden5_LabVIEW_2016.vi". In der Datei "Kalibrierung_Dreilochsonde.vi" bzw. "Kalibrierung_Fünflochsonde.vi" werden die gewünschten Kalibrierparameter eingetragen. Die Bezeichnung der Ausgabedatei und die in Kapitel 5 beschriebene Ausgleichszeit für das Umschalten der Druckmessung sind in der Datei "sonden3_LabVIEW_2016.vi" bzw. "sonden5_LabVIEW_2016.vi" einzutragen. Der Dateiname der Ausgabedatei setzt sich einheitlich aus dem Tag der Messung und einer fortlaufenden Nummer zusammen. Beispielsweise wird für die erste Messung am 14. März 2023 der Dateiname "14032301.dat" gewählt.

Wenn alle Parameter in den LabVIEW Programmen eingestellt sind, kann die Kalibrierung gestartet werden. Die Dauer der Kalibrierung variiert je nach verwendetem Typ der Sonde und den eingestellten Parametern. Bei den in dieser

Diplomarbeit verwendeten Winkelbereich von $\pm 30^\circ$, einer Anzahl von 13 Kalibrierpunkten auf diesem Winkelbereich und einer Ausgleichszeit von 10s ergibt sich für die Dreilochsonde eine Kalibrierdauer von ca. 12 Minuten. Bei der Fünflochsonde dauert die Kalibrierung rund 4:45 Stunden.

8. Auswertung der Messergebnisse

Zur Auswertung der Messergebnisse wird die Entwicklungsumgebung Spyder mit der Programmiersprache Python in der Version 3.9 verwendet. Die eigens dafür angefertigten Python Codes sind im Anhang A zu finden. Für die Auswertung der Dreilochsonde und der Fünflochsonde werden zwei unterschiedliche Codes verwendet. Mit Hilfe des Programmes kann die Ausgabedatei, beschrieben in Kapitel 7.2 und 7.3, eingelesen werden und daraus die Bohrungs- und Kalibrierkoeffizienten berechnet und graphisch aufbereitet werden. Nötige Eingaben hierfür sind der Umgebungsdruck p_u , der Durchmesser des Sondenkopfes d_K , die spezifische Gaskonstante R und der Isentropenexponent κ .

Mit Hilfe der theoretischen Grundlagen aus den Kapiteln 3 und 4 können nun die Strömungsgeschwindigkeit w , die Machzahl Ma , die Reynoldszahl Re sowie die Bohrungs- und Kalibrierkoeffizienten berechnet werden. Zunächst wird mittels Gleichung (3.10) die Dichte der Luft berechnet.

$$\rho = \frac{p_u}{R \cdot T} \quad (8.1)$$

Unter Verwendung der Formel (3.5) kann anschließend die Strömungsgeschwindigkeit w berechnet werden.

$$w = \sqrt{2 \cdot \frac{p_t - p_u}{\rho}} \quad (8.2)$$

Anschließend wird die Machzahl Ma der Strömung mittels der Formel (3.7), in welche Formel (3.11) bereits eingesetzt ist, berechnet.

$$Ma = \frac{w}{\sqrt{\kappa \cdot R \cdot T}} \quad (8.3)$$

Die kinematische Zähigkeit ν für die Luft wird näherungsweise über Formel (3.8) berechnet.

$$\nu = (0,93 \cdot T + 134,7) \cdot 10^{-7} \quad \text{in} \quad [m^2/s] \quad (8.4)$$

Nun kann die Reynoldszahl Re der Umströmung des Sondenkopfes berechnet werden.

$$Re = \frac{w \cdot d_K}{\nu} \quad (8.5)$$

Aus den Formeln (4.2) bis (4.10) werden schließlich die einzelnen Bohrungs- und Kalibrierkoeffizienten für die Drei- bzw. Fünflochsonden berechnet.

Anschließend wird eine Auswertungsdatei mit allen Informationen über die Strömungsgeschwindigkeit w , die Machzahl Ma , die Reynoldszahl Re und über alle Bohrungs- und Kalibrierkoeffizienten, sowie die zugehörigen Diagramme erstellt.

In dieser Diplomarbeit wird jeweils eine Dreilochsonde und Fünflochsonde unter verschiedenen Reynoldszahlen kalibriert. Als Dreilochsonde wird die SVUSS/3 Kobrasonde, als Fünflochsonde die SVUSS/5 Kegelsonde verwendet. Die aus der Kalibrierung gewonnenen Kalibrierkurven werden mit Daten aus früheren Kalibrierungen, unter denselben Bedingungen, und dem Stromlinienprojektionsverfahren verglichen.

8.1. Kalibrierung der SVUSS/3 Kobrasonde

Die SVUSS/3 Kobrasonde wurde bei insgesamt drei verschiedenen Reynoldszahlen kalibriert. Hier wurden alte Auswertungsergebnisse des Instituts, welche mit der alten händisch zu verstellenden Vorrichtung ermittelt wurden, für die Reynoldszahlen $Re = 8\,296$, $Re = 10\,363$ und $Re = 11\,250$ [31] als Vergleich herangezogen. Diese wurden bei einer Drehzahl des Radialgebläses von $n = 1\,100\text{ U/min}$, $n = 1\,300\text{ U/min}$ und $n = 1\,500\text{ U/min}$ aufgenommen.

In Abbildung 8.1 bis Abbildung 8.3 sind die Kalibrierkurven der SVUSS/3 Kobrasonde für die drei genannten Reynoldszahlen zu sehen. Die blaue Kurve stellt dabei jeweils die historischen Daten des Instituts, die rote Kurve die mit Hilfe der automatischen Verstelleinrichtung neu aufgenommenen Kalibrierkurven und die grüne Kurve das Ergebnis des Stromlinienprojektionsverfahrens dar.

Im Allgemeinen ist für alle drei Kalibrierkoeffizienten zu sehen, dass die Kalibrierkurven deutlich glatter verlaufen als bei den händisch eingestellten Messdaten. Dies liegt vor allem an der erhöhten Genauigkeit der Schrittmotoren gegenüber der mangelnden Präzision und Fehleranfälligkeit einer händischen Einstellung.

Am Gierwinkelkoeffizienten k_β und dem Totaldruckkoeffizienten k_t ist eine horizontale Verschiebung zwischen den händisch und den automatisch aufgenommenen Kurven zu erkennen. Da die ursprüngliche Nullpunkteinstellung vor der Kalibrierung mit Hilfe der Libelle einer Wasserwaage gemacht wird, ist die horizontale Verschiebung auf die Ungenauigkeit in dieser Einrichtungsmethode zurückzuführen.

Während sich die neu aufgenommenen Kalibrierkurven für den Gierwinkelkoeffizient k_β und den Totaldruckkoeffizient k_t für die drei unterschiedlichen Reynoldszahlen

kaum unterscheiden, ist beim statischen Druckkoeffizienten k_s ein starker Unterschied zwischen den Kurven zu sehen. Hier kann auch der in Kapitel 4.5.1 beschriebene Einfluss der Reynoldszahl auf den statischen Druckkoeffizienten erkannt werden. Dieser sinkt über den kompletten Bereich des Gierwinkels $\Delta\beta$ bei steigender Reynoldszahl Re . Der Einfluss der Reynoldszahl auf den Gierwinkelkoeffizient k_β und den Totaldruckkoeffizient k_t ist hier nicht erkennbar.

Beim Gierwinkelkoeffizienten k_β und dem Totaldruckkoeffizienten k_t sind deutliche Ähnlichkeiten zu den Ergebnissen des Stromlinienprojektionsverfahrens erkennbar. Beim statischen Druckkoeffizienten k_s unterscheiden sich die Kalibrierkurven sehr stark vom Stromlinienprojektionsverfahren.

Vor allem beim statischen Druckkoeffizienten k_s zeigt sich ein asymmetrisches Verhalten der Kalibrierkurven. Diese Asymmetrie ist auf Fertigungsungenauigkeiten zurückzuführen.

Abbildung 8.1: Vergleich des Gierwinkelkoeffizienten k_β der SVUSS/3 Kobrasonde für drei verschiedene Reynoldszahlen

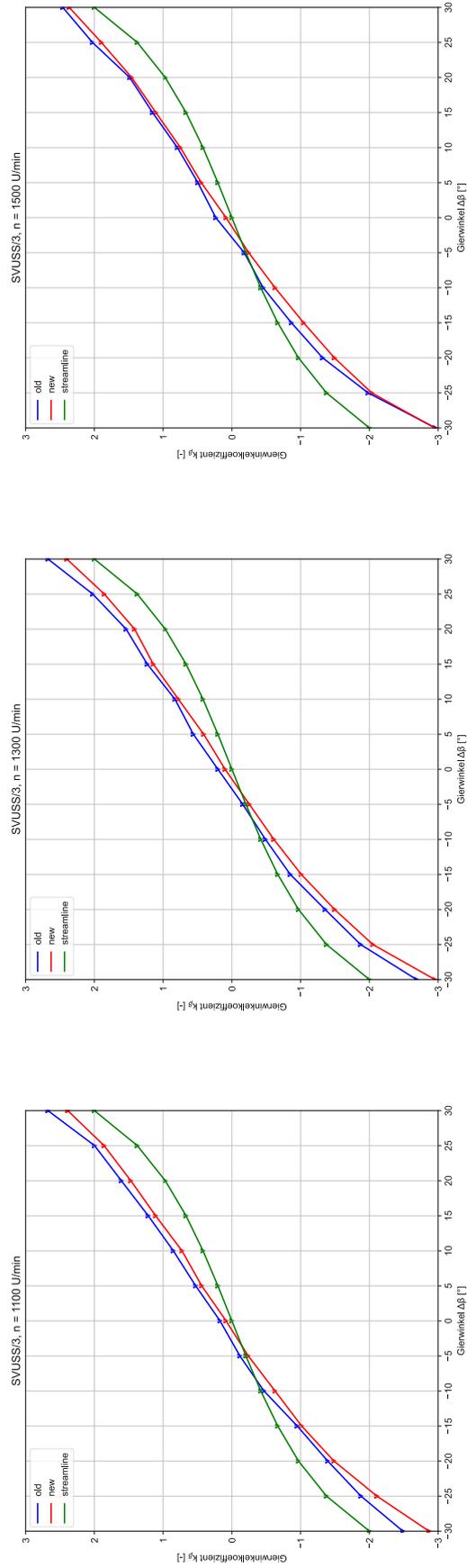


Abbildung 8.1(a): Gierwinkelkoeffizient k_β bei einer Reynoldszahl $Re = 8296$

Abbildung 8.1(b): Gierwinkelkoeffizient k_β bei einer Reynoldszahl $Re = 10363$

Abbildung 8.1(c): Gierwinkelkoeffizient k_β bei einer Reynoldszahl $Re = 11250$

Abbildung 8.2: Vergleich des statischen Druckkoeffizienten k_s der SVUSS/3 Kobrasonde für drei verschiedene Reynoldszahlen

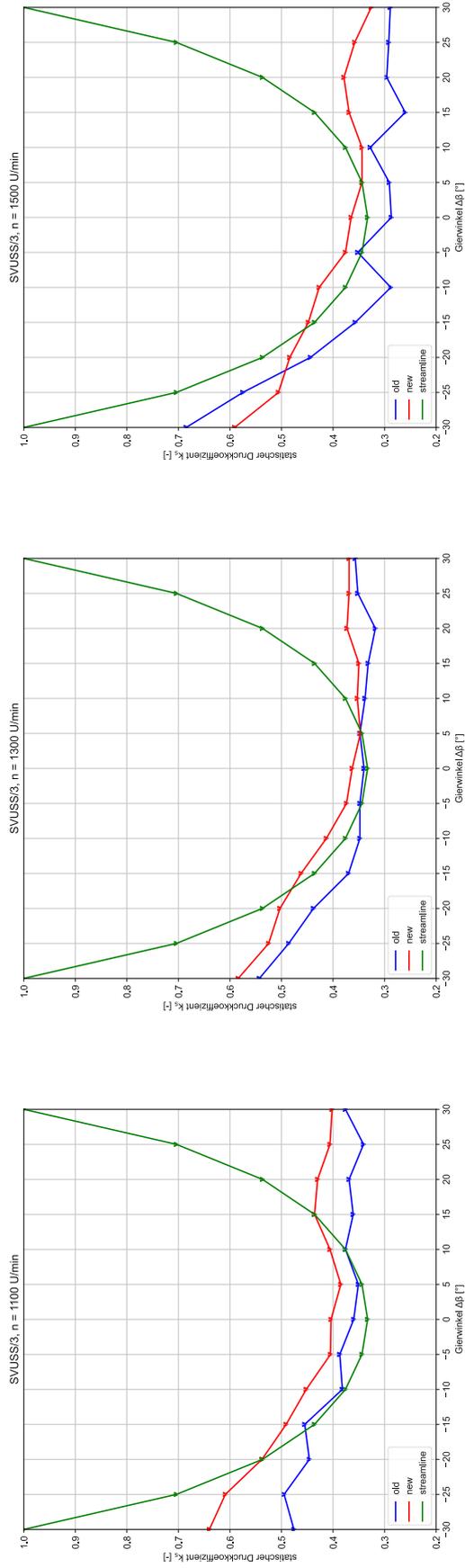


Abbildung 8.2(a): Statischer Druckkoeffizient k_s bei einer Reynoldszahl $Re = 8296$

Abbildung 8.2(b): Statischer Druckkoeffizient k_s bei einer Reynoldszahl $Re = 10363$

Abbildung 8.2(c): Statischer Druckkoeffizient k_s bei einer Reynoldszahl $Re = 11250$

Abbildung 8.3: Vergleich des Totaldruckkoeffizienten k_t der SVUSS/3 Kobrasonde für drei verschiedene Reynoldszahlen

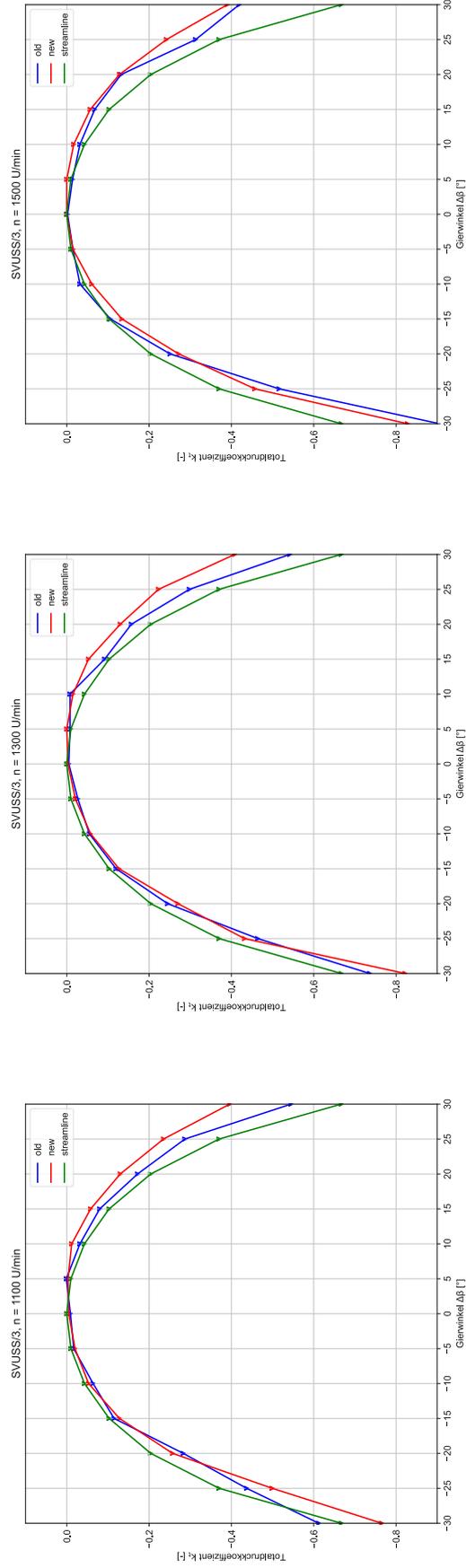


Abbildung 8.3(a): Totaldruckkoeffizient k_t bei einer Reynoldszahl $Re = 8296$

Abbildung 8.3(b): Totaldruckkoeffizient k_t bei einer Reynoldszahl $Re = 10363$

Abbildung 8.3(c): Totaldruckkoeffizient k_t bei einer Reynoldszahl $Re = 11250$

8.2. Kalibrierung der SVUSS/5 Kegelsonde

Die Kalibrierung der SVUSS/5 Kegelsonde erfolgte bei zwei unterschiedlichen Reynoldszahlen. Zum Vergleich wurden die Messwerte von Chondrokostas [6] für die Reynoldszahlen $Re = 6\,500$ und $Re = 13\,000$ herangezogen. Diese entsprechen einer einzustellenden Drehzahl des Radialgebläses von $n = 700\text{ U/min}$ und $n = 1\,400\text{ U/min}$.

Die Ergebnisse der Kalibrierung sind in Abbildung 8.4 bis Abbildung 8.11 zu sehen. Für jeden Kalibrierkoeffizienten ist auf der linken Seite das Kalibrierfeld aus Chondrokostas [6], in der Mitte das neu aufgenommene Kalibrierfeld mit Hilfe der automatischen Verstelleinrichtung und auf der rechten Seite das berechnete Kalibrierfeld mittels des Stromlinienprojektionsverfahrens zu sehen.

Wie schon bei den Ergebnissen der Dreilochsonde zu sehen, verlaufen auch die Kalibrierfelder der Fünflochsonde, für beide Reynoldszahlen, deutlich glatter als die händisch aufgenommenen Kalibrierfelder aus Chondrokostas [6].

Für die Kalibrierfelder des Gierwinkelkoeffizienten k_β , des Nickwinkelkoeffizienten k_γ und des Totaldruckkoeffizienten k_t ist eine deutliche Ähnlichkeit zu denen des Stromlinienprojektionsverfahrens zu sehen. Die auftretenden Unterschiede zu den Ergebnissen aus dem Stromlinienprojektionsverfahren entstehen vor allem durch Einflussfaktoren, welche bei diesem theoretischen Verfahren nicht abgebildet werden können. Dies umfasst zum Beispiel Fertigungsungenauigkeiten, wodurch das asymmetrische Verhalten in den gemessenen Kalibrierfeldern entsteht, oder auch Strömungsablösungen an den von der Strömung abgewandten Bohrungen, wodurch an diesen ein geringerer Druck gemessen wird.

Die Kalibrierfelder des statischen Druckkoeffizienten k_s unterscheiden sich, wie schon bei der SVUSS/3 Dreilochsonde, gänzlich von den Ergebnissen aus dem Stromlinienprojektionsverfahren. Diese Abweichung von den theoretischen Überlegungen wurden schon in den Diplomarbeiten von Chondrokostas [6] und Hilgert [7] festgestellt und liegt an der Strömungsablösung an den scharfen Kanten des Sondenkopfes. In den theoretischen Überlegungen des Stromlinienprojektionsverfahrens, liegt bei großen Gier- bzw. Nickwinkeln an den von der Strömung abgewandten Bohrungen der Umgebungsdruck p_u an. Durch die in der Realität auftretende Ablösung der Strömung an den scharfen Kanten des Sondenkopfes, wird jedoch ein geringerer Druck als der Umgebungsdruck p_u gemessen. Dies sorgt dafür, dass der statische Druckkoeffizient k_s für hohe Ausschlagwinkel in der Realität kleiner bzw. sogar negativ, anstatt größer wie im Stromlinienprojektionsverfahren, wird.

Wie schon bei der Dreilochsonde, ist der Einfluss der Reynoldszahl sehr deutlich beim statischen Druckkoeffizienten k_s in Abbildung 8.8(b) und Abbildung 8.9(b) zu sehen. Bei der höheren Reynoldszahl ist der statische Druckkoeffizient k_s für alle Kombinationen aus Gier- und Nickwinkel geringer als bei der niedrigeren Reynoldszahl. Dies entspricht dem beschriebenen Einfluss der Reynoldszahl auf den statischen Druckkoeffizienten aus Kapitel 4.5.1.

Der Einfluss der Reynoldszahl auf den Gierwinkelkoeffizienten k_β , den Nickwinkelkoeffizienten k_γ und den Totaldruckkoeffizienten k_t ist weder bei den neu aufgenommenen Kalibrierfeldern, noch bei denen aus Chondrokostas [6] zu erkennen.

Im Allgemeinen ist zu sagen, dass sich die neu aufgenommenen Kalibrierfelder kaum von denen aus Chondrokostas [6] unterscheiden. Der wesentliche Unterschied besteht in der Glattheit der einzelnen Kalibrierfelder, was auf die erhöhte Genauigkeit der Verstelleinrichtung zurückzuführen ist, und dem deutlich geringeren Aufwand der Durchführung einer Kalibrierung.

Abbildung 8.4: Vergleich des Gierwinkelkoeffizienten k_β der SVUSS/5 Kegelsonde für $Re = 6\,500$

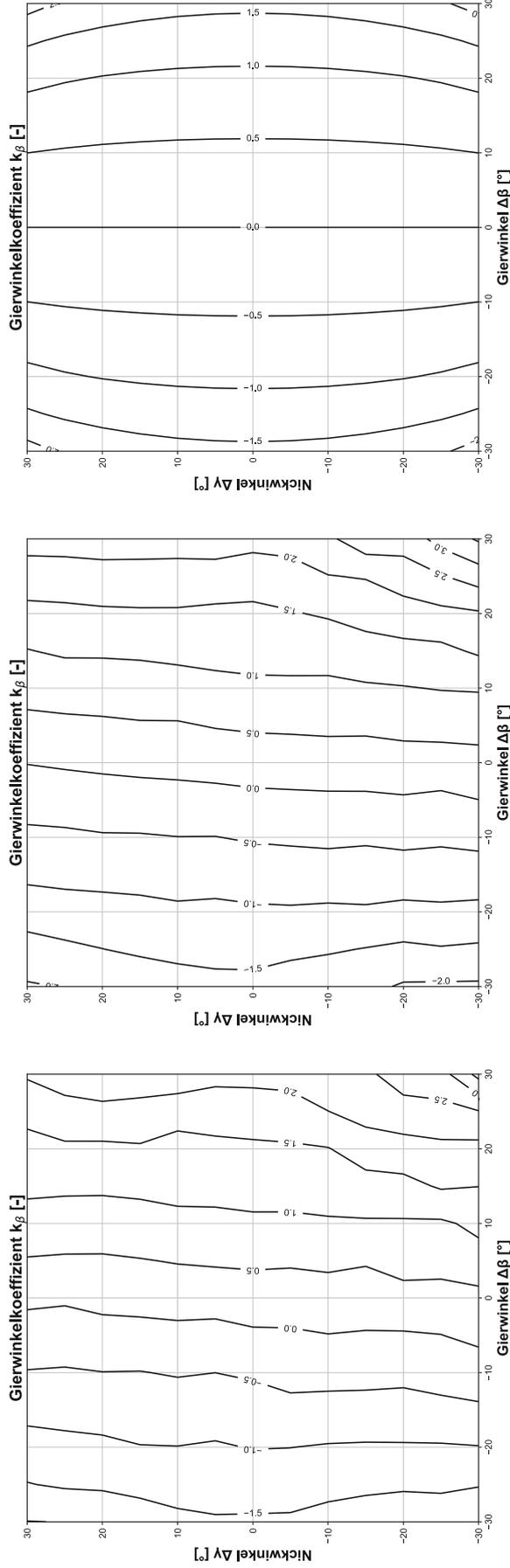


Abbildung 8.4(a): Gierwinkelkoeffizient k_β aus Chondrokostas [6] bei einer Reynoldszahl $Re = 6\,500$

Abbildung 8.4(b): Gierwinkelkoeffizient k_β , ermittelt mit Hilfe der automatischen Verstelleinrichtung, bei einer Reynoldszahl $Re = 6\,500$

Abbildung 8.4(c): Gierwinkelkoeffizient k_β , ermittelt mit Hilfe des Stromlinienprojektionsverfahrens

Abbildung 8.5: Vergleich des Gierwinkelkoeffizienten k_β der SVUSS/5 Kegelsonde für $Re = 13\ 000$

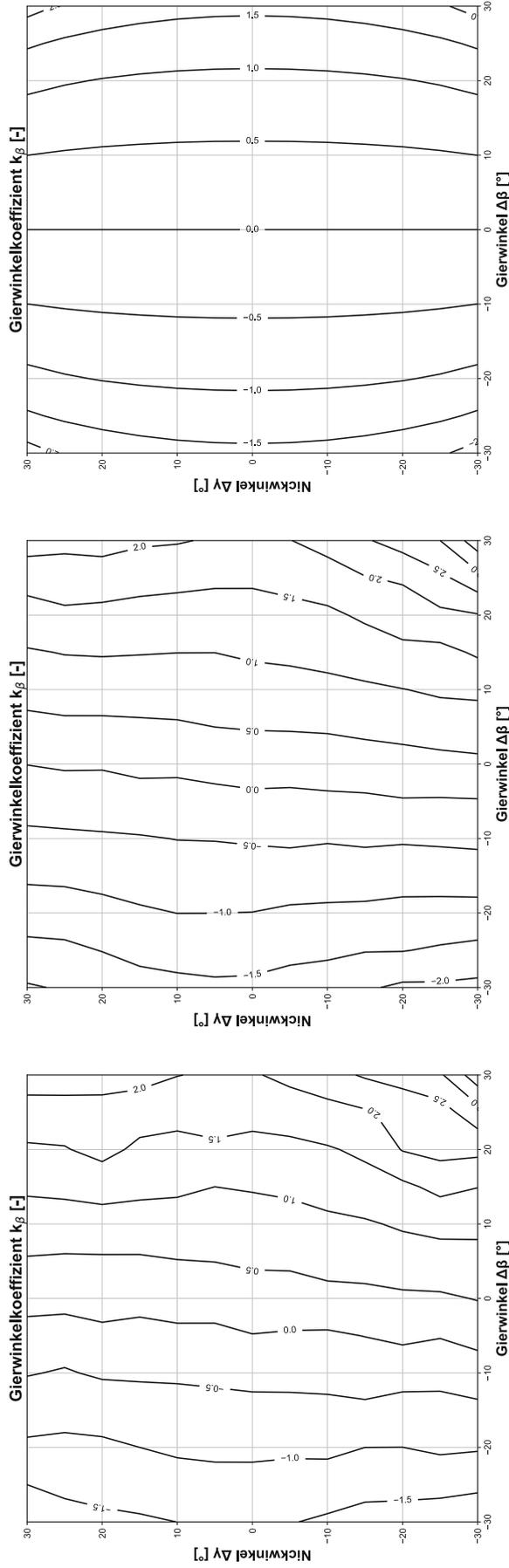


Abbildung 8.5(a): Gierwinkelkoeffizient k_β aus Chondrokostas [6] bei einer Reynoldszahl $Re = 13\ 000$

Abbildung 8.5(b): Gierwinkelkoeffizient k_β , ermittelt mit Hilfe der automatischen Verstellrichtung, bei einer Reynoldszahl $Re = 13\ 000$

Abbildung 8.5(c): Gierwinkelkoeffizient k_β , ermittelt mit Hilfe des Stromlinienprojektionsverfahrens

Abbildung 8.6: Vergleich des Nickwinkelkoeffizienten k_y der SVUSS/5 Kegelsonde für $Re = 6\,500$

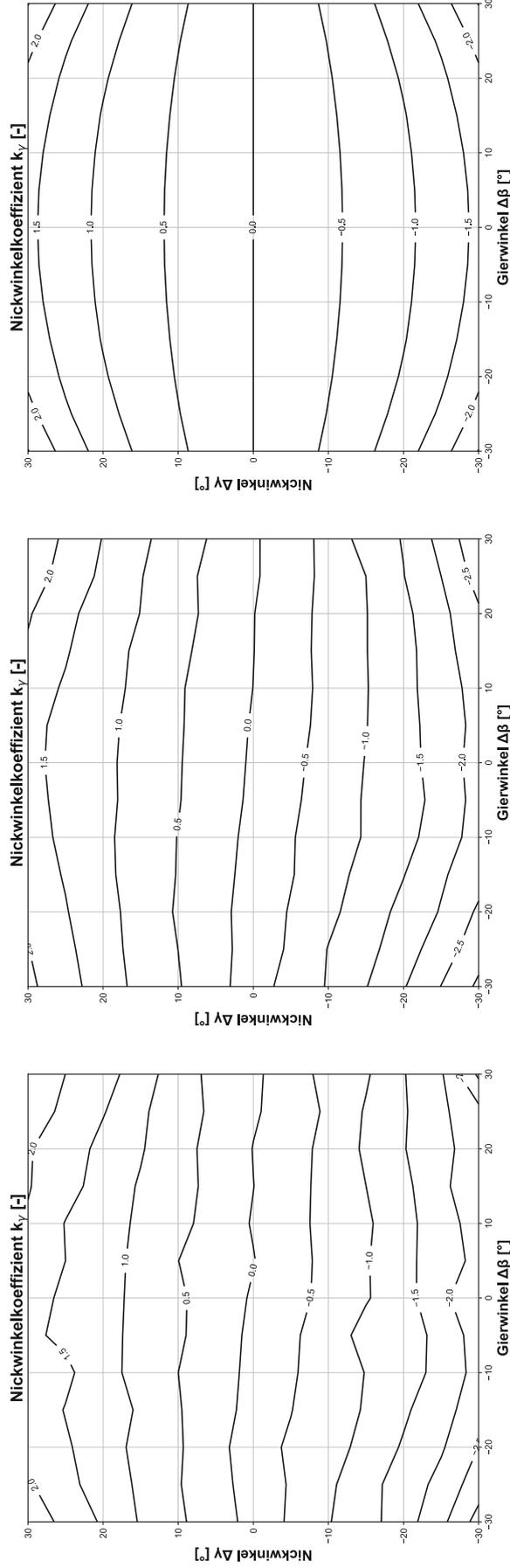


Abbildung 8.6(a): Nickwinkelkoeffizient k_y aus Chondrokostas [6] bei einer Reynoldszahl $Re = 6\,500$

Abbildung 8.6(b): Nickwinkelkoeffizient k_y , ermittelt mit Hilfe der automatischen Verstelleinrichtung, bei einer Reynoldszahl $Re = 6\,500$

Abbildung 8.6(c): Nickwinkelkoeffizient k_y , ermittelt mit Hilfe des Stromlinienprojektionsverfahrens

Abbildung 8.7: Vergleich des Nickwinkelkoeffizienten k_y der SVUSS/5 Kegelsonde für $Re = 13\,000$

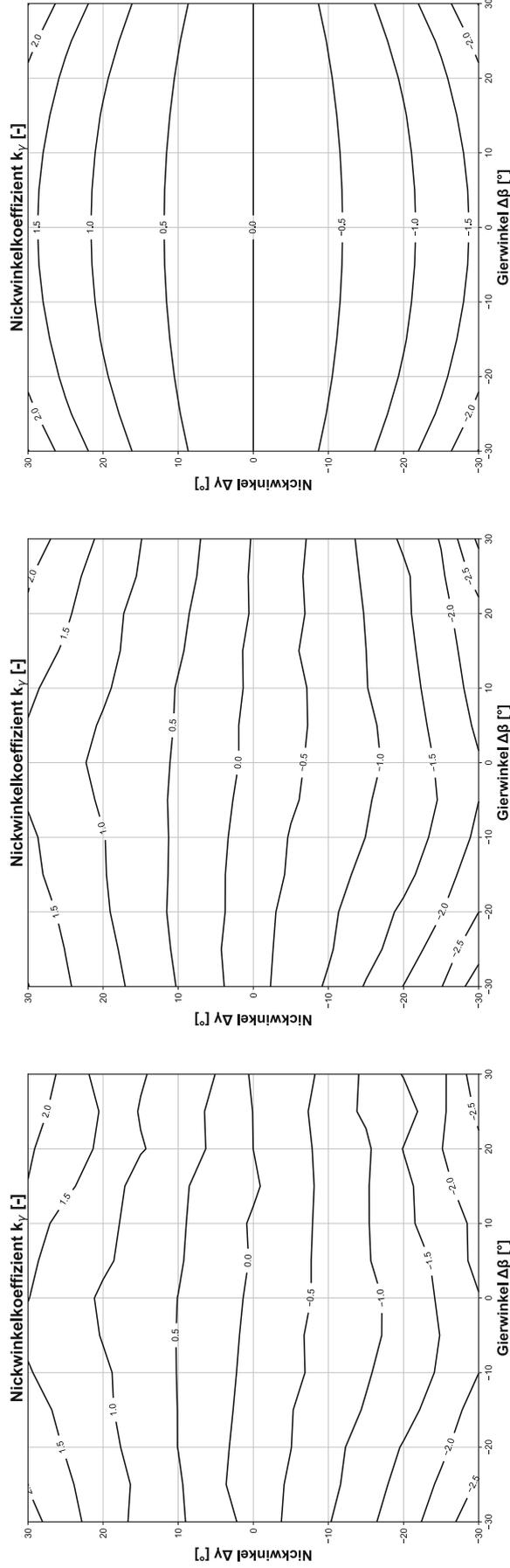


Abbildung 8.7(a): Nickwinkelkoeffizient k_y aus Chondrokostas [6] bei einer Reynoldszahl $Re = 13\,000$

Abbildung 8.7(b): Nickwinkelkoeffizient k_y , ermittelt mit Hilfe der automatischen Verstellereinrichtung, bei einer Reynoldszahl $Re = 13\,000$

Abbildung 8.7(c): Nickwinkelkoeffizient k_y , ermittelt mit Hilfe des Stromlinienprojektionsverfahrens

Abbildung 8.8: Vergleich des statischen Druckkoeffizienten k_s der SVUSS/5 Kegelsonde für $Re = 6\,500$

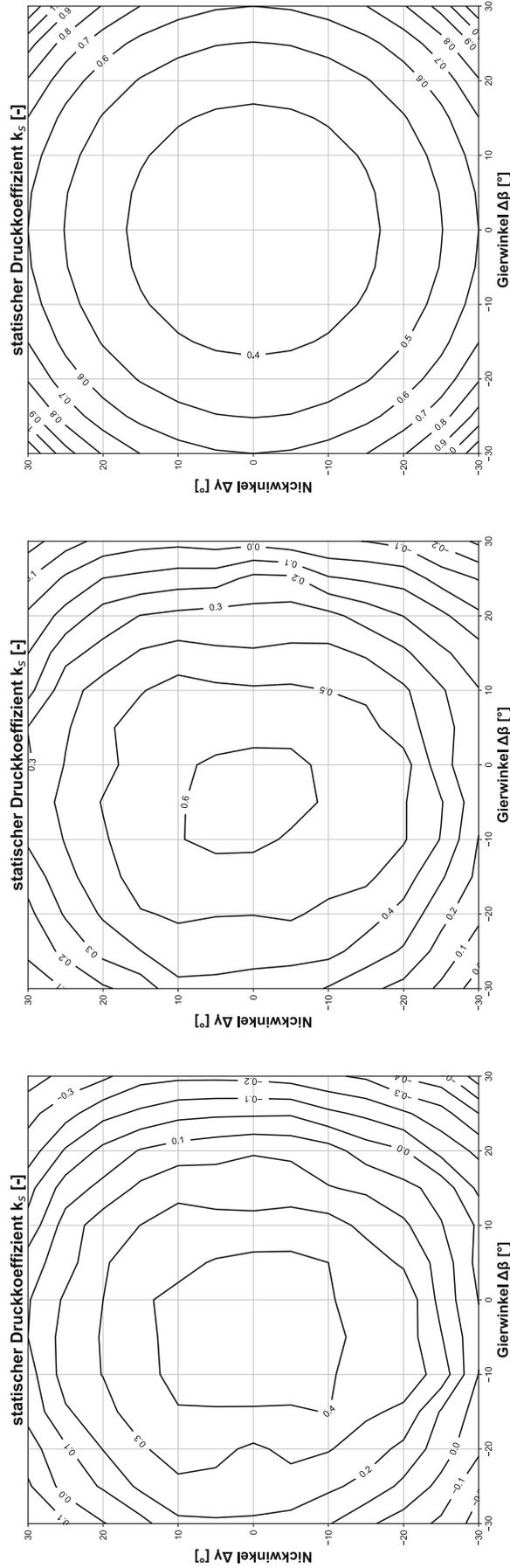


Abbildung 8.8(a): Statischer Druckkoeffizient k_s aus Chondrokostas [6] bei einer Reynoldszahl $Re = 6\,500$

Abbildung 8.8(b): Statischer Druckkoeffizient k_s , ermittelt mit Hilfe der automatischen Verstelleinrichtung, bei einer Reynoldszahl $Re = 6\,500$

Abbildung 8.8(c): Statischer Druckkoeffizient k_s , ermittelt mit Hilfe des Stromlinienprojektionsverfahrens

Abbildung 8.9: Vergleich des statischen Druckkoeffizienten k_s der SVUSS/5 Kegelsonde für $Re = 13\,000$

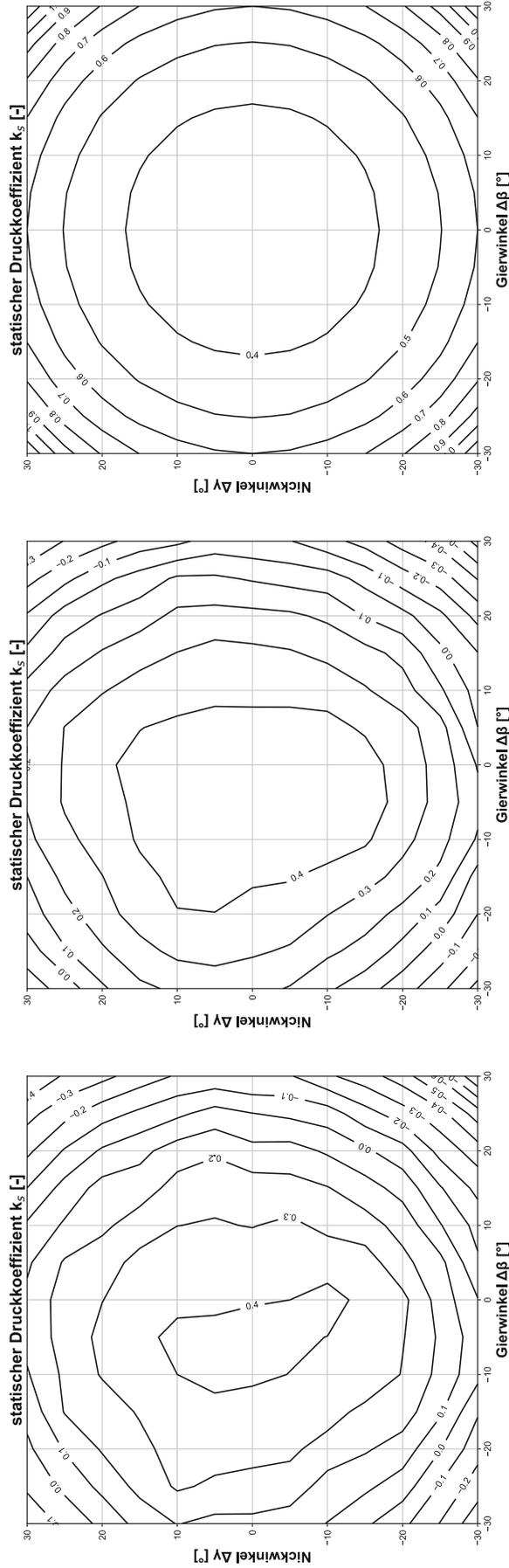


Abbildung 8.9(a): Statischer Druckkoeffizient k_s aus Chondrokostas [6] bei einer Reynoldszahl $Re = 13\,000$

Abbildung 8.9(b): Statischer Druckkoeffizient k_s , ermittelt mit Hilfe der automatischen Verstelleinrichtung, bei einer Reynoldszahl $Re = 13\,000$

Abbildung 8.9(c): Statischer Druckkoeffizient k_s , ermittelt mit Hilfe des Stromlinienprojektionsverfahrens

Abbildung 8.10: Vergleich des Totaldruckkoeffizienten k_t der SVUSS/5 Kegelsonde für $Re = 6\,500$

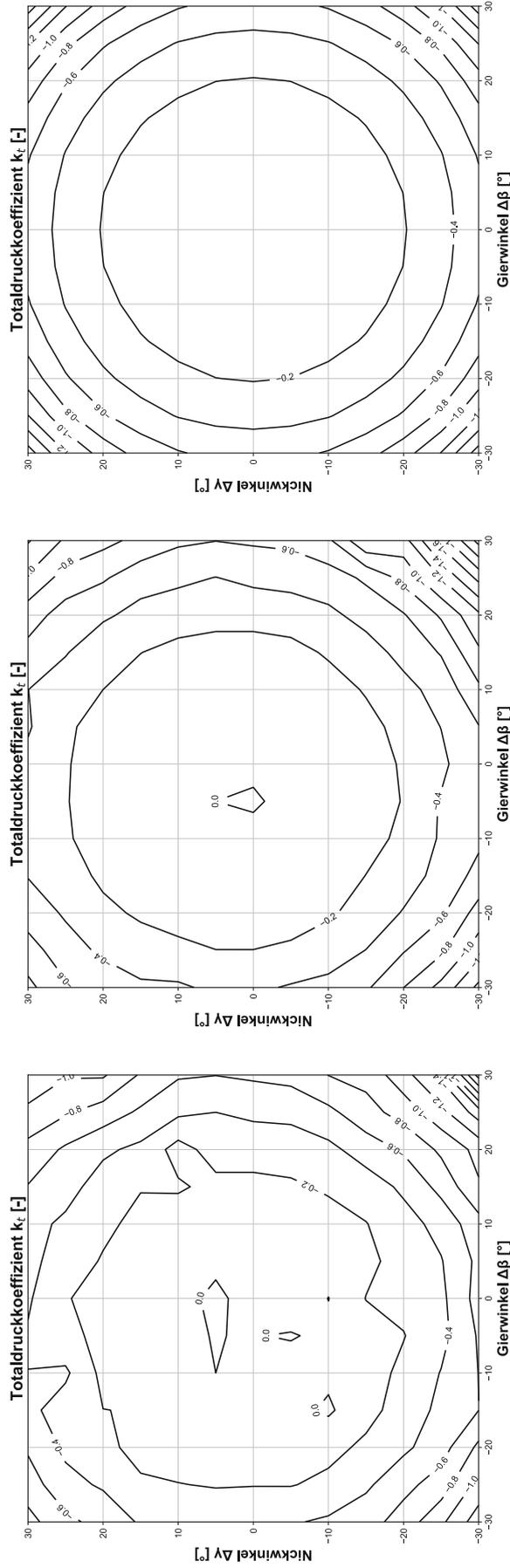


Abbildung 8.10(a): Totaldruckkoeffizient k_t aus Chondrokostas [6] bei einer Reynoldszahl $Re = 6\,500$

Abbildung 8.10(b): Totaldruckkoeffizient k_t ermittelt mit Hilfe der automatischen Verstelleinrichtung, bei einer Reynoldszahl $Re = 6\,500$

Abbildung 8.10(c): Totaldruckkoeffizient k_t ermittelt mit Hilfe des Stromlinienprojektionsverfahrens

Abbildung 8.11: Vergleich des Totaldruckkoeffizienten k_t der SVUSS/5 Kegelsonde für $Re = 13\ 000$

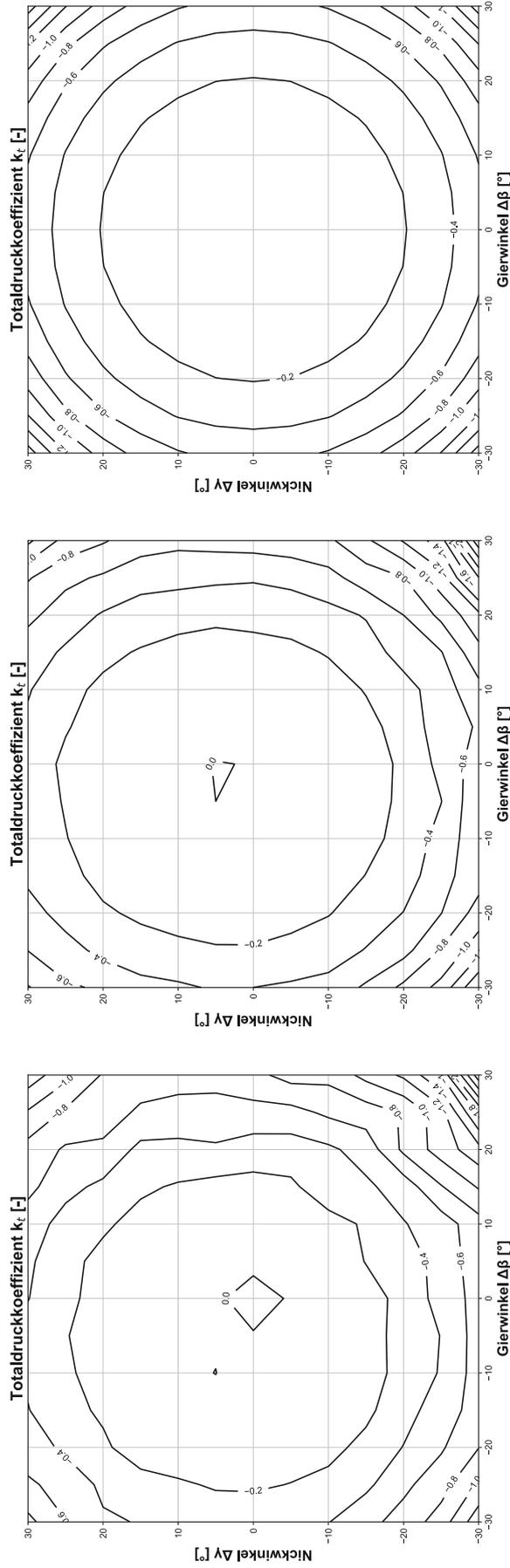


Abbildung 8.11(a): Totaldruckkoeffizient k_t aus Chondrokostas [6] bei einer Reynoldszahl $Re = 13\ 000$

Abbildung 8.11(b): Totaldruckkoeffizient k_t , ermittelt mit Hilfe der automatischen Verstelleinrichtung, bei einer Reynoldszahl $Re = 13\ 000$

Abbildung 8.11(c): Totaldruckkoeffizient k_t , ermittelt mit Hilfe des Stromlinienprojektionsverfahrens

9. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde eine automatische Verstelleinrichtung zur Kalibrierung von pneumatischen Strömungs sonden entwickelt und gefertigt. Diese dient zum Einstellen des Gier- und Nickwinkels der Strömungs sonde vor dem Freistrahwindkanal des Instituts für Energietechnik und Thermodynamik. Die Verstellung der beiden Anströmwinkel erfolgt mit der Hilfe von zwei Schrittmotoren, welche in Verbindung mit einem Mikrocontroller über die Software LabVIEW angesteuert werden können. Zur Funktionsüberprüfung wurde eine Dreilochsonde und eine Fünflochsonde des Instituts für verschiedene Reynoldszahlen kalibriert und die Ergebnisse mit früheren Kalibrierdaten verglichen. Die Kalibrierkurven konnten sowohl für die Dreilochsonde als auch für die Fünflochsonde gut reproduziert werden und es zeigt sich ein Trend von deutlich glatteren Kalibrierkurven durch eine verbesserte Genauigkeit. Die neu gewonnenen Kalibrierkurven für die SVUSS/3 Dreilochsonde und die SVUSS/5 Fünflochsonde dienen als Grundlage für zukünftige Strömungsmessungen im Ausschlagverfahren. Die in dieser Diplomarbeit ausgelegte automatische Verstelleinrichtung dient für zukünftige Kalibrierungen der restlichen pneumatischen Strömungs sonden des Instituts und kann gut in eine entsprechende Laborübung integriert werden.

Die Verwendung der automatischen Verstelleinrichtung bringt eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit der Ergebnisse. Durch die Verwendung von Schrittmotoren und der anschließenden Stirnradstufe konnte diese von ca. $\pm 0,5^\circ$ (mündliche Aussage von Prof. Willinger am 11. Mai 2023) auf $\pm 0,02^\circ$ verbessert werden. Die vollständige Kalibrierung einer Fünflochsonde für einen Winkelbereich von $\pm 30^\circ$, einer Anzahl von 13 Messpunkten je Gier- und Nickwinkelbereich (169 Messpunkte gesamt) und einer verwendeten Ausgleichszeit von 10s dauerte 4:45 Stunden. Die reine Einstellzeit der Sonde für alle 169 Messpunkte beträgt davon nur 4 Minuten. Da während der Kalibrierung zweimal ein Problem mit dem Druckmessstellenumschaltgerät Master Unit 3 von FURNESS CONTROLS auftrat, musste die Messung jeweils neu gestartet werden und das Gerät stand unter ständiger Beobachtung. Nach dem Umbau auf ein anderes Druckmessstellenumschaltgerät (Master Unit 1), ebenfalls von der Firma FURNESS CONTROLS, trat dieser Fehler jedoch nicht mehr auf. Durch die ständige Beobachtung des Geräts, konnte der Vorteil der automatischen Verstellung der Sonde, dass nebenbei auch andere Arbeiten durchgeführt werden können, ohne alles durchgehend zu überwachen, noch nicht genutzt werden. Dies sollte jedoch seit dem Umbau auf ein anderes Druckmessstellengerät der Fall sein.

Ein Ausblick für zukünftige Abschlussarbeiten am Institut bietet die Kalibrierung der restlichen Strömungsvektorsonden des Instituts. Ähnlich wie in Schrempf [5] können

auch die vorhandenen Dreilochsonden auf ihren Nickwinkeleinfluss untersucht werden. Das größte Potential würde eine Überarbeitung der Druckmesstechnik bieten, da diese momentan den Großteil der Kalibrierdauern einnimmt. Hier können alle vorliegenden Sonden hinsichtlich ihrer nötigen Ausgleichszeit untersucht werden, als auch die Verwendung mehrerer Druckmessgeräte in Betracht gezogen werden, um alle Drücke zeitgleich messen zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] A. L. Treaster and A. M. Yocum, 'The Calibration and Application of Five-hole Probes', *ISA Transactions*, vol. 18, no. 3, pp. 23–34, 1979.
- [2] S. P. Venkateshan, *Mechanical Measurements*. Cham: Springer International Publishing, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-73620-0.
- [3] D. Telionis, Y. Yang, and O. Rediniotis, 'Recent Developments in Multi-Hole Probe (MHP) Technology', in *Proceedings of COBEM 2009*, Gramado, RS, Brazil: ABCM, 2009.
- [4] 'Conventional Probes - Aeroprobe'. <https://www.aeroprobe.com/conventional-probes/> (accessed Apr. 20, 2023).
- [5] M. Schrempf, 'Kalibrierung von pneumatischen Dreilochsonden unter Nickwinkleinfluss', Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Wien, 2016.
- [6] C. Chondrokostas, 'Calibration of Pneumatic Five-Hole Probes in the Free-Jet Wind Tunnel', Diploma Thesis, Vienna University of Technology, Institute of Thermodynamics and Energy Conversion, Vienna, 2005.
- [7] M. Hilgert, 'Kalibrierung von pneumatischen Strömungsvektorsonden im Freistrahwindkanal', Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Wien, 2015.
- [8] H. E. Siekmann and P. U. Thamsen, *Strömungslehre*, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg New York, 2008.
- [9] H. C. Kuhlmann, *Strömungsmechanik*. München: Pearson Studium, 2007.
- [10] K. Engmann, *Technologie des Flugzeugs*, 5th ed. Würzburg: Vogel Fachbuch, 2009.
- [11] VDI e. V., Ed., *VDI-Wärmeatlas*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-19981-3.
- [12] H. Herwig and C. H. Kautz, *Technische Thermodynamik*. in Ing : Maschinenbau. München [u.a.]: Pearson Studium, 2007.
- [13] R. Majumdar, D. Chowdhury, P. K. Sinha, and B. Majumdar, 'Calibration of a Five-Hole Probe in Null and Non-Null Technique', *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 6, no. 5, pp. 27–32, 2016.

- [14] R. Willinger, 'Vorausberechnung der Kalibrierkurven von pneumatischen Strömungssonden mittels CFD', 2002.
- [15] R. G. Dominy and H. P. Hodson, 'An Investigation of Factors Influencing the Calibration of Five-Hole Probes for Three-Dimensional Flow Measurements', *Journal of Turbomachinery*, vol. 115, no. 3, pp. 513–519, Jul. 1993, doi: 10.1115/1.2929281.
- [16] S. Lee and S. Jun, 'Reynolds number effects on the non-nulling calibration of a cone-type five-hole probe for turbomachinery applications', *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 19, pp. 1632–1648, Aug. 2005, doi: 10.1007/BF03023940.
- [17] S. Derflinger, 'Messung des Turbulenzgrades an einem Freistrahwindkanal', Bachelorarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Wien, 2012.
- [18] N. Sitaram, B. Lakshminarayana, and A. Ravindranath, 'Conventional Probes for the Relative Flow Measurement in a Turbomachinery Rotor Blade Passage', *Journal of Engineering for Power*, vol. 103, no. 2, pp. 406–414, Apr. 1981, doi: 10.1115/1.3230735.
- [19] R. Willinger, 'A three-hole pressure probe exposed to wall proximity effects: experimental, numerical and analytical investigation', in *Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'06)*, Budapest, Hungary, Sep. 2006.
- [20] R. Willinger, 'Freistrahwindkanal Dokumentation'. 2020.
- [21] P.-A. Gieß, H.-J. Rehder, and F. Kost, 'A new test facility for probe calibration offering independent variation of Mach and Reynolds number', in *Proceedings of the 15th Bi-Annual Symposium on Measuring Techniques in Transonic and Supersonic Flow in Cascades and Turbomachines*, Firenze, Sep. 2000.
- [22] C. Georgakis, I. Bennett, and P. C. Ivey, 'Fast Response Probes Measuring Unsteady Flows in High-Speed Research Compressors', *ASME Paper GT2003-38160*.
- [23] J. Town and C. Camci, 'A Time Efficient Adaptive Gridding Approach and Improved Calibrations in Five-Hole Probe Measurements', *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2015, pp. 1–14, 2015, doi: 10.1155/2015/376967.
- [24] A. Rozynski, 'Entwurf und Simulation eines Kalibrierstandes für pneumatische Fünflochsonden', Diplomarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik, Graz, 2015.

- [25] 'Schrittmotor'. <https://harmonicdrive.de/de/glossar/schrittmotor> (accessed Apr. 27, 2023).
- [26] 'Stepper Motor Basics'. <https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/stepper-motor-basics.html> (accessed Apr. 27, 2023).
- [27] 'TP Serie 1-Achs-Stepping-Kit mit geschlossenem Regelkreis 72Ncm/101.98oz.in Nema 17 Motor & Treiber - 1-CL42T-P07|STEPPERONLINE'. <https://www.omc-stepperonline.com/de/closed-loop-schrittmotor-kit/tp-serie-1-achs-stepping-kit-mit-geschlossenem-regelkreis-72ncm-101-98oz-in-nema-17-motor-treiber-1-cl42t-p07?mfp=184-rahmengr-e-mm%5BNema%2017%20%2842%20x%2042%29%5D> (accessed May 05, 2023).
- [28] 'UNO R3 | Arduino Documentation'. <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3> (accessed May 14, 2023).
- [29] 'LINX [LabVIEW MakerHub]'. <https://www.labviewmakerhub.com/doku.php?id=libraries:linx:start> (accessed Apr. 28, 2023).
- [30] 'NI Learning Center - NI'. <https://learn.ni.com/learn/article/labview-tutorial> (accessed Apr. 29, 2023).
- [31] W. Beer, 'Optimisation of a Compound Lean Turbine Blade in a Linear Cascade', Dissertation, Vienna University of Technology, Institute of Thermodynamics and Energy Conversion, Vienna, 2008.

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 2.1: Prinzipdarstellung Pitot-Rohr	2
Abbildung 2.2: Auswahl verschiedener Mehrlochsonden [4]	3
Abbildung 2.3: Nummerierung der Messbohrungen, Dreilochsonde [5].....	3
Abbildung 2.4: Definition des Anströmwinkels, Dreilochsonde [5]	4
Abbildung 2.5: Nummerierung der Messbohrungen, Fünflochsonde [6].....	5
Abbildung 2.6: Definition des Anströmwinkels, Fünflochsonde [7].....	6
Abbildung 3.1: Stromröhre und Übergang zum Stromfaden [8].....	7
Abbildung 4.1: Beispielhafte Darstellung der Kalibrierkurven einer Dreilochsonde ..	17
Abbildung 4.2: Beispielhafte Darstellung des Kalibrierfeldes einer Fünflochsonde für den Nickwinkelkoeffizienten (links) und den Totaldruckkoeffizienten (rechts)	17
Abbildung 4.3: Beispielhafte Darstellung des Kalibrierfeldes einer Fünflochsonde für den Nickwinkelkoeffizienten (links) und den Totaldruckkoeffizienten (rechts) mit Hilfe des Stromlinienprojektionsverfahrens.....	18
Abbildung 4.4: Turbulenzgrad in Abhängigkeit der Drehzahl [17].....	19
Abbildung 5.1: Skizze des Freistrahwindkanals [20].....	22
Abbildung 5.2: Düsendeschwindigkeit in Abhängigkeit der Motordrehzahl [20].....	23
Abbildung 5.3: Messaufbau am Institut zur Kalibrierung einer Fünflochsonde [7]	24
Abbildung 5.4: Druckdifferenz $p_i - p_u$, aufgetragen über der Zeit	24
Abbildung 6.1: Alte Verstelleinrichtung inklusive Strömungssonde [7]	25
Abbildung 6.2: Funktionsprinzip des Schrittmotors	26
Abbildung 6.3: Schematische Darstellung und Verkabelung der elektrischen Bauteile	32
Abbildung 6.4: Übersicht der mechanischen Komponenten	33
Abbildung 6.5: Vorrichtung zur Verstellung des Gierwinkels	34
Abbildung 6.6: Vorrichtung zur Verstellung des Nickwinkels	37

Abbildung 6.7: Konstruktion der Profilverrichtung	38
Abbildung 7.1: GUI der Sondenverstellung.....	41
Abbildung 7.2: Blockdiagramm der Sondenverstellung	43
Abbildung 7.3: GUI der Kalibrierung von Dreilochsonden.....	44
Abbildung 7.4: Blockdiagramm der Kalibrierung von Dreilochsonden	46
Abbildung 7.5: GUI der Kalibrierung von Fünflochsonden	47
Abbildung 7.6: Blockdiagramm der Kalibrierung für Fünflochsonden	49
Abbildung 8.1: Vergleich des Gierwinkelkoeffizienten k_β der SVUSS/3 Kobrasonde für drei verschiedene Reynoldszahlen	55
Abbildung 8.2: Vergleich des statischen Druckkoeffizienten k_s der SVUSS/3 Kobrasonde für drei verschiedene Reynoldszahlen	56
Abbildung 8.3: Vergleich des Totaldruckkoeffizienten k_t der SVUSS/3 Kobrasonde für drei verschiedene Reynoldszahlen	57
Abbildung 8.4: Vergleich des Gierwinkelkoeffizienten k_β der SVUSS/5 Kegelsonde für $Re = 6\,500$	60
Abbildung 8.5: Vergleich des Gierwinkelkoeffizienten k_β der SVUSS/5 Kegelsonde für $Re = 13\,000$	61
Abbildung 8.6: Vergleich des Nickwinkelkoeffizienten k_γ der SVUSS/5 Kegelsonde für $Re = 6\,500$	62
Abbildung 8.7: Vergleich des Nickwinkelkoeffizienten k_γ der SVUSS/5 Kegelsonde für $Re = 13\,000$	63
Abbildung 8.8: Vergleich des statischen Druckkoeffizienten k_s der SVUSS/5 Kegelsonde für $Re = 6\,500$	64
Abbildung 8.9: Vergleich des statischen Druckkoeffizienten k_s der SVUSS/5 Kegelsonde für $Re = 13\,000$	65
Abbildung 8.10: Vergleich des Totaldruckkoeffizienten k_t der SVUSS/5 Kegelsonde für $Re = 6\,500$	66
Abbildung 8.11: Vergleich des Totaldruckkoeffizienten k_t der SVUSS/5 Kegelsonde für $Re = 13\,000$	67

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 2.1: Übersicht Dreilochsonden E302.....	4
Tabelle 2.2: Übersicht Fünflochsonden E302.....	6
Tabelle 6.1: Spezifikation des 17E1K-07 Schrittmotors [27].....	29
Tabelle 6.2: Spezifikation des CL42T Schrittmotortreibers [27].....	29
Tabelle 6.3: Pinbelegung und Farbe der Kabel für die Schrittmotoren [27]	30
Tabelle 6.4: Pinbelegung und Farbe der Kabel für die Encoder [27]	30
Tabelle 6.5: Pinbelegung des Arduinos	31
Tabelle 6.6: Stückliste für die Verstelleinrichtung für den Gierwinkel.....	35
Tabelle 6.7: Stückliste für die Verstelleinrichtung für den Nickwinkel	37
Tabelle 6.8: Stückliste für die Profilverrichtung.....	39
Tabelle 7.1: Funktionen der Cases im Blockdiagramm für die Sondenverstellung ...	42
Tabelle 7.2: Funktionen der Cases im Blockdiagramm für die Kalibrierung von Dreilochsonden.....	45
Tabelle 7.3: Form der Ausgabedatei der Kalibrierung einer Dreilochsonde.....	45
Tabelle 7.4: Form der Ausgabedatei der Kalibrierung einer Fünflochsonde	48

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Anhang

A. Python Code

A.A. Dreilochsonde

```
#####
##### Import der benötigten Python Plugins #####
#####

import pandas as pd
import math
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib as mpl
import numpy as np
import datetime
import os

#####
##### Eingabe der Bedingungen am Testtag #####
#####

# Messreihe 'DDMMYYXX' (XX ist hier die fortlaufende Nummer des Tages)
Messreihe = '14032303'

# Eingabe der Umgebungsbedingungen
pu = 977.1 #mbar
tu = 21.6 #°C

# Gebläsedrehzahl
n = 1406 #U/min

# Sondentyp
Typ = 'SVUSS/3'

# Sondendurchmesser
d = 2.4 #mm

# Temperaturfühler
Fühler = 'PT 100'

# Düsenabstand
s = 130 #mm

# Angabe des Winkelbereichs bei der Messung (Wenn der Bereich +/-30° war, dann
# einfach 30 hier angeben)
yaw_angle = 30 #grd

#####
##### Auswertung der Messergebnisse, ab hier nichts ändern #####
#####

# Transformation des Datums in das verwendete Format
date_string = Messreihe[:-2]
date = datetime.datetime.strptime(date_string, '%y%m%d').date()
```

```

# Transformation des Sondentyps in ein Format welches für einen Dateipfad
# verwendet werden kann
typ = Typ.replace('/', '_')
typ = typ.replace(' ', '_')

# Umrechnung des Umgebungsdrucks in [Pa]
pu = 100*pu

# Gaskonstanten
kappa = 1.4
R = 287

# Einlesen der .dat Datei
Dateiname = 'Dreilochsonde_'+typ+'_'+date_string + '_' + str(n)
Dateipfad = 'Kalibrierdaten/' + Messreihe + '.dat'
Kalibrierdaten = pd.read_csv(Dateipfad, header=None, delimiter='\s+')
Kalibrierdaten = Kalibrierdaten.iloc[:, :5]
Kalibrierdaten.columns = ['t [°C]',
                          'pt-pu [Pa]',
                          'p1-pu [Pa]',
                          'p2-pu [Pa]',
                          'p3-pu [Pa]']

# Herauslesen wie viele Punkte gemessen wurden und erstellung einer Liste mit
# den entsprechenden Winkeln
num_entries = len(Kalibrierdaten)
step = (2*yaw_angle)/(num_entries-1)
yaw_angles = [-yaw_angle+i*step for i in range(num_entries)]
Kalibrierdaten.insert(0, '\u0394 [°]', yaw_angles)
Kalibrierdaten = Kalibrierdaten.replace(',', '.', regex=True).astype(float)

# Erstellen von einzelnen Listen der Messwerte
t = Kalibrierdaten['t [°C]'].tolist()
ptpu = Kalibrierdaten['pt-pu [Pa]'].tolist()
p1pu = Kalibrierdaten['p1-pu [Pa]'].tolist()
p2pu = Kalibrierdaten['p2-pu [Pa]'].tolist()
p3pu = Kalibrierdaten['p3-pu [Pa]'].tolist()

# Erstellen von leeren Listen für die spätere Berechnung
rho = [0]*num_entries
w = [0]*num_entries
Ma = [0]*num_entries
nu = [0]*num_entries
Re = [0]*num_entries
k1 = [0]*num_entries
k2 = [0]*num_entries
k3 = [0]*num_entries
kb = [0]*num_entries
kt = [0]*num_entries
ks = [0]*num_entries

# Berechnung der Koeffizienten mittels for Schleife
for i in range(num_entries):

    # Luftdichte
    rho[i] = pu/(R*(t[i]+273.15))

    # Strömungsgeschwindigkeit
    w[i] = math.sqrt(2*ptpu[i]/rho[i])

```

```

# Machzahl
Ma[i] = w[i]/(math.sqrt(kappa*R*(t[i]+273.15)))

# kinematische Zähigkeit
nu[i] = (0.93*t[i]+134.7)*1E-7

# Reynoldszahl
Re[i] = w[i]*d/(1000*nu[i])

# Mittlerer Druck
pq = (p2pu[i]+p3pu[i]+2*pu)/2

# Bohrungskoeffizienten
k1[i] = p1pu[i]/(ptpu[i])
k2[i] = p2pu[i]/(ptpu[i])
k3[i] = p3pu[i]/(ptpu[i])

# Kalibrierkoeffizienten
kb[i] = (p2pu[i]-p3pu[i])/(p1pu[i]+pu-pq)
kt[i] = (p1pu[i]-ptpu[i])/(p1pu[i]+pu-pq)
ks[i] = (pq-pu)/(p1pu[i]+pu-pq)

# Erstellung des Auswerte Dataframes
Auswertung = pd.DataFrame({
    '\u0394 [\u00b0]': yaw_angles,
    'w [m/s]': w,
    'Ma [-]': Ma,
    'Re [-]': Re,
    'k1 [-]': k1,
    'k2 [-]': k2,
    'k3 [-]': k3,
    'kb [-]': kb,
    'kt [-]': kt,
    'ks [-]': ks,
})

#####
##### Abspeichern der Faktoren und Erstellung von Plots #####
#####

# Erstellung eines neuen Ordners, benannt nach dem Dateinamen
os.makedirs(Dateiname , exist_ok=True)

# Abspeichern der Auswertung als csv-Datei

Auswertung = Auswertung.round(3)
Auswertung = Auswertung.round({'Re [-]': 0})
Auswertung.to_csv(Dateiname + '/Auswertung_' + Dateiname + '.dat',
                  sep='\t', index=False)

# Plotten der Ergebnisse

# Einstellen der gewünschten Schriftart für die Plots
mpl.rcParams['font.family'] = 'Arial'

# Bohrungskoeffizienten
plt.figure(figsize=(8, 8))
plt.plot(yaw_angles,k1,label=r"$\mathrm{k}_1$ [-]",color='blue')

```

```

plt.plot(yaw_angles,k2,label=r"$\mathrm{k}_2$" [-]',color='red')
plt.plot(yaw_angles,k3,label=r"$\mathrm{k}_3$" [-]',color='green')
plt.xlabel('Gierwinkel \u0394 [\u00b0]')
plt.ylabel('Bohrungskoeffizienten [-]')
plt.title(Typ+', n = ' + str(n) + ' U/min, ' + Messreihe)
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.xticks(np.arange(-yaw_angle, yaw_angle+1, step))
plt.xlim(-yaw_angle, yaw_angle)
max_y = max(max(k1), max(k2), max(k3))
ylim_max = math.ceil(max_y / 0.2) * 0.2 + 0.2
min_y = min(min(k1), min(k2), min(k3))
ylim_min = math.floor(min_y / 0.2) * 0.2 - 0.2
plt.ylim(ylim_min, ylim_max)
plt.yticks(np.arange(ylim_min, ylim_max+0.1, 0.2))
plt.scatter(yaw_angles, k1, marker='v', s=20, color='blue')
plt.scatter(yaw_angles, k2, marker='v', s=20, color='red')
plt.scatter(yaw_angles, k3, marker='v', s=20, color='green')
plt.savefig(Dateiname+'Bohrungskoeffizienten_'+Dateiname+'.svg',format='svg')

# Kalibrierkoeffizienten
plt.figure(figsize=(8, 8))
plt.plot(yaw_angles,kb,label=r"$\mathrm{k}_\beta$" [-]',color='blue')
plt.plot(yaw_angles,kt,label=r"$\mathrm{k}_t$" [-]',color='red')
plt.plot(yaw_angles,ks,label=r"$\mathrm{k}_s$" [-]',color='green')
plt.xlabel('Gierwinkel \u0394 [\u00b0]')
plt.ylabel('Kalibrierkoeffizienten [-]')
plt.title(Typ+', n = ' + str(n) + ' U/min, ' + Messreihe)
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.xticks(np.arange(-yaw_angle, yaw_angle+1, step))
plt.xlim(-yaw_angle, yaw_angle)
max_y = max(max(kb), max(kt), max(ks))
ylim_max = math.ceil(max_y / 0.5) * 0.5 + 0.5
min_y = min(min(kb), min(kt), min(ks))
ylim_min = math.floor(min_y / 0.5) * 0.5 - 0.5
plt.ylim(ylim_min, ylim_max)
plt.yticks(np.arange(ylim_min, ylim_max+0.1, 0.5))
plt.scatter(yaw_angles, kb, marker='v', s=20, color='blue')
plt.scatter(yaw_angles, kt, marker='v', s=20, color='red')
plt.scatter(yaw_angles, ks, marker='v', s=20, color='green')
plt.savefig(Dateiname+'Kalibrierkoeffizienten_'+Dateiname+'.svg',format='svg')

```

A.B. Fünflochsonde

```
#####
##### Import der benötigten Python Plugins #####
#####

import pandas as pd
import math
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib as mpl
import numpy as np
import datetime
import os

#####
##### Eingabe der Bedingungen am Testtag #####
#####

# Messreihe 'DDMMYYXX' (XX ist hier die fortlaufende Nummer des Tages)
Messreihe = '04052301'

# Eingabe der Umgebungsbedingungen
pu = 999.9    #mbar
tu = 25.2    #°C

# Gebläsedrehzahl
n = 700    #U/min

# Sondentyp
Typ = 'SVUSS/5'

# Sondendurchmesser
d = 3    #mm

# Temperaturfühler
Fühler = 'PT 100'

# Düsenabstand
s = 205    #mm

# Angabe des Winkelbereichs bei der Messung (Wenn der Bereich +/-30° war, dann
# einfach 30 hier angeben)
yaw_angle = 30    #grd
pitch_angle = 30    #grd

#####
##### Auswertung der Messergebnisse, ab hier nichts ändern #####
#####

# Transformation des Datums in das verwendete Format
date_string = Messreihe[:-2]
date = datetime.datetime.strptime(date_string, '%y%m%d').date()

# Transformation des Sondentyps in ein Format welches für einen Dateipfad
# verwendet werden kann
typ = Typ.replace('/', '_')
typ = typ.replace(' ', '_')
```

```

# Umrechnung des Umgebungsdrucks in [Pa]
pu = 100*pu

# Gaskonstanten
kappa = 1.4
R = 287

# Einlesen der .dat Datei
Dateiname = 'Fünflochsonde_'+typ+'_' + date_string + '_' + str(n)
Dateipfad = 'Kalibrierdaten/' + Messreihe + '.dat'
Kalibrierdaten = pd.read_csv(Dateipfad, header=None, delimiter='\s+')
Kalibrierdaten = Kalibrierdaten.iloc[:, :7]
Kalibrierdaten.columns = ['t [°C]',
                          'pt-pu [Pa]',
                          'p1-pu [Pa]',
                          'p2-pu [Pa]',
                          'p3-pu [Pa]',
                          'p4-pu [Pa]',
                          'p5-pu [Pa]']

# Herauslesen wie viele Punkte gemessen wurden und Erstellung einer Liste mit
# den entsprechenden Winkeln
num_entries = int(math.sqrt(len(Kalibrierdaten)))
step = (2*yaw_angle)/(num_entries-1)
yaw_angles = [-yaw_angle+i*step for i in range(num_entries)] * num_entries
pitch_angles = [-pitch_angle+i*step for i in range(num_entries)]
pitch_angles = [x for x in pitch_angles for _ in range(num_entries)]
Kalibrierdaten.insert(0, '\u0394\u03B2 [°]', yaw_angles)
Kalibrierdaten.insert(0, '\u0394\u03B3 [°]', pitch_angles)
Kalibrierdaten = Kalibrierdaten.replace(',', '.', regex=True).astype(float)

# Erstellen von einzelnen Listen der Messwerte
t = Kalibrierdaten['t [°C]'].tolist()
ptpu = Kalibrierdaten['pt-pu [Pa]'].tolist()
p1pu = Kalibrierdaten['p1-pu [Pa]'].tolist()
p2pu = Kalibrierdaten['p2-pu [Pa]'].tolist()
p3pu = Kalibrierdaten['p3-pu [Pa]'].tolist()
p4pu = Kalibrierdaten['p4-pu [Pa]'].tolist()
p5pu = Kalibrierdaten['p5-pu [Pa]'].tolist()

# Erstellen von leeren Listen für die spätere Berechnung
rho = [0]*num_entries**2
w = [0]*num_entries**2
Ma = [0]*num_entries**2
nu = [0]*num_entries**2
Re = [0]*num_entries**2
k1 = [0]*num_entries**2
k2 = [0]*num_entries**2
k3 = [0]*num_entries**2
k4 = [0]*num_entries**2
k5 = [0]*num_entries**2
kb = [0]*num_entries**2
kg = [0]*num_entries**2
kt = [0]*num_entries**2
ks = [0]*num_entries**2

# Berechnung der Koeffizienten mittels for Schleife
for i in range(num_entries**2):

```

```

# Luftdichte
rho[i] = pu/(R*(t[i]+273.15))

# Strömungsgeschwindigkeit
w[i] = math.sqrt(2*ptpu[i]/rho[i])

# Machzahl
Ma[i] = w[i]/(math.sqrt(kappa*R*(t[i]+273.15)))

# kinematische Zähigkeit
nu[i] = (0.93*t[i]+134.7)*1E-7

# Reynoldszahl
Re[i] = w[i]*d/(1000*nu[i])

# Mittlerer Druck
pq = (p2pu[i]+p3pu[i]+p4pu[i]+p5pu[i]+4*pu)/4

# Bohrungskoeffizienten
k1[i] = p1pu[i]/(ptpu[i])
k2[i] = p2pu[i]/(ptpu[i])
k3[i] = p3pu[i]/(ptpu[i])
k4[i] = p4pu[i]/(ptpu[i])
k5[i] = p5pu[i]/(ptpu[i])

# Kalibrierkoeffizienten
kb[i] = (p2pu[i]-p3pu[i])/(p1pu[i]+pu-pq)
kg[i] = (p4pu[i]-p5pu[i])/(p1pu[i]+pu-pq)
kt[i] = (p1pu[i]-ptpu[i])/(p1pu[i]+pu-pq)
ks[i] = (pq-pu)/(p1pu[i]+pu-pq)

# Erstellung des Auswerte Dataframes
Auswertung = pd.DataFrame({
    '\u0394 [\u00b0]': pitch_angles,
    '\u0392 [\u00b0]': yaw_angles,
    'w [m/s]': w,
    'Ma [-]': Ma,
    'Re [-]': Re,
    'k1 [-]': k1,
    'k2 [-]': k2,
    'k3 [-]': k3,
    'k4 [-]': k4,
    'k5 [-]': k5,
    'k\u03b2 [-]': kb,
    'k\u03b3 [-]': kg,
    'kt [-]': kt,
    'ks [-]': ks,
})

#####
##### Abspeichern der Faktoren und Erstellung von Plots #####
#####

# Erstellung eines neuen Ordners, benannt nach dem Dateinamen
os.makedirs(Dateiname , exist_ok=True)

# Abspeichern der Auswertung als csv-Datei

Auswertung = Auswertung.round(3)

```

```

Auswertung = Auswertung.round({'Re [-]': 0})
Auswertung.to_csv(Dateiname + '/Auswertung_' + Dateiname + '.dat',
                  sep='\t', index=False)

# Plotten der Ergebnisse

# Einstellen der gewünschten Schriftart für die Plots
mpl.rcParams['font.family'] = 'Arial'

##### Bohrungskoeffizient 1 #####

# X-, Y-, und Z-Werte erstellen
X = Auswertung['\u0394\u03B2 [°]'].values.reshape(13, 13)
Y = Auswertung['\u0394\u03B3 [°]'].values.reshape(13, 13)
Z = Auswertung['k1 [-]'].values.reshape(13, 13)

# Contour-Plot erstellen
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 8))
z_min = np.floor(np.min(Z) / 0.1) * 0.1
z_max = np.ceil(np.max(Z) / 0.1) * 0.1
levels = np.arange(z_min, z_max, 0.1)
cs = ax.contour(X, Y, Z, levels=levels, colors='k', linestyle='solid')
clabels = plt.clabel(cs, inline=True, fontsize=10)
plt.grid(True)

# Passe die Größe des Diagramms an
plt.subplots_adjust(left=0.1, bottom=0.1, right=0.95, top=0.95)

# Achsenbeschriftungen und Titel hinzufügen
ax.set_xlabel('Gierwinkel \u0394\u03B2 [°]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_ylabel('Nickwinkel \u0394\u03B3 [°]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_title('Bohrungskoeffizient k$1$ [-]', fontsize=18, fontweight='bold')

# Speichere das Diagramm als SVG-Datei ab
plt.savefig(Dateiname+'Bohrungskoeffizient_1_'+Dateiname+'.svg', format='svg')

##### Bohrungskoeffizient 2 #####

# X-, Y-, und Z-Werte erstellen
X = Auswertung['\u0394\u03B2 [°]'].values.reshape(13, 13)
Y = Auswertung['\u0394\u03B3 [°]'].values.reshape(13, 13)
Z = Auswertung['k2 [-]'].values.reshape(13, 13)

# Contour-Plot erstellen
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 8))
z_min = np.floor(np.min(Z) / 0.1) * 0.1
z_max = np.ceil(np.max(Z) / 0.1) * 0.1
levels = np.arange(z_min, z_max, 0.1)
cs = ax.contour(X, Y, Z, levels=levels, colors='k', linestyle='solid')
clabels = plt.clabel(cs, inline=True, fontsize=10)
plt.grid(True)

# Passe die Größe des Diagramms an
plt.subplots_adjust(left=0.1, bottom=0.1, right=0.95, top=0.95)

# Achsenbeschriftungen und Titel hinzufügen
ax.set_xlabel('Gierwinkel \u0394\u03B2 [°]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_ylabel('Nickwinkel \u0394\u03B3 [°]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_title('Bohrungskoeffizient k$2$ [-]', fontsize=18, fontweight='bold')

```

```

# Speichere das Diagramm als SVG-Datei ab
plt.savefig(Dateiname+'/Bohrungskoeffizient_2_'+Dateiname+'.svg',format='svg')

##### Bohrungskoeffizient 3 #####

# X-, Y-, und Z-Werte erstellen
X = Auswertung['\u0394 [\u00B0]'].values.reshape(13, 13)
Y = Auswertung['\u0393 [\u00B0]'].values.reshape(13, 13)
Z = Auswertung['k3 [-]'].values.reshape(13, 13)

# Contour-Plot erstellen
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 8))
z_min = np.floor(np.min(Z) / 0.1) * 0.1
z_max = np.ceil(np.max(Z) / 0.1) * 0.1
levels = np.arange(z_min, z_max, 0.1)
cs = ax.contour(X, Y, Z, levels=levels, colors='k', linestyle='solid')
clabels = plt.clabel(cs, inline=True, fontsize=10)
plt.grid(True)

# Passe die Gr\u00f6\u00dfe des Diagramms an
plt.subplots_adjust(left=0.1, bottom=0.1, right=0.95, top=0.95)

# Achsenbeschriftungen und Titel hinzuf\u00fcgen
ax.set_xlabel('Gierwinkel \u0394 [\u00B0]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_ylabel('Nickwinkel \u0393 [\u00B0]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_title('Bohrungskoeffizient k$3$ [-]', fontsize=18, fontweight='bold')

# Speichere das Diagramm als SVG-Datei ab
plt.savefig(Dateiname+'/Bohrungskoeffizient_3_'+Dateiname+'.svg',format='svg')

##### Bohrungskoeffizient 4 #####

# X-, Y-, und Z-Werte erstellen
X = Auswertung['\u0394 [\u00B0]'].values.reshape(13, 13)
Y = Auswertung['\u0393 [\u00B0]'].values.reshape(13, 13)
Z = Auswertung['k4 [-]'].values.reshape(13, 13)

# Contour-Plot erstellen
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 8))
z_min = np.floor(np.min(Z) / 0.1) * 0.1
z_max = np.ceil(np.max(Z) / 0.1) * 0.1
levels = np.arange(z_min, z_max, 0.1)
cs = ax.contour(X, Y, Z, levels=levels, colors='k', linestyle='solid')
clabels = plt.clabel(cs, inline=True, fontsize=10)
plt.grid(True)

# Passe die Gr\u00f6\u00dfe des Diagramms an
plt.subplots_adjust(left=0.1, bottom=0.1, right=0.95, top=0.95)

# Achsenbeschriftungen und Titel hinzuf\u00fcgen
ax.set_xlabel('Gierwinkel \u0394 [\u00B0]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_ylabel('Nickwinkel \u0393 [\u00B0]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_title('Bohrungskoeffizient k$4$ [-]', fontsize=18, fontweight='bold')

# Speichere das Diagramm als SVG-Datei ab
plt.savefig(Dateiname+'/Bohrungskoeffizient_4_'+Dateiname+'.svg',format='svg')

##### Bohrungskoeffizient 5 #####

```

```

# X-, Y-, und Z-Werte erstellen
X = Auswertung['\u0394\u03B2 [°]'].values.reshape(13, 13)
Y = Auswertung['\u0394\u03B3 [°]'].values.reshape(13, 13)
Z = Auswertung['k5 [-]'].values.reshape(13, 13)

# Contour-Plot erstellen
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 8))
z_min = np.floor(np.min(Z) / 0.1) * 0.1
z_max = np.ceil(np.max(Z) / 0.1) * 0.1
levels = np.arange(z_min, z_max, 0.1)
cs = ax.contour(X, Y, Z, levels=levels, colors='k', linestyle='solid')
clabels = plt.clabel(cs, inline=True, fontsize=10)
plt.grid(True)

# Passe die Größe des Diagramms an
plt.subplots_adjust(left=0.1, bottom=0.1, right=0.95, top=0.95)

# Achsenbeschriftungen und Titel hinzufügen
ax.set_xlabel('Gierwinkel \u0394\u03B2 [°]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_ylabel('Nickwinkel \u0394\u03B3 [°]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_title('Bohrungskoeffizient k$5$ [-]', fontsize=18, fontweight='bold')

# Speichere das Diagramm als SVG-Datei ab
plt.savefig(Dateiname+'/Bohrungskoeffizient_5_'+Dateiname+'.svg', format='svg')

##### Gierwinkelkoeffizient #####

# X-, Y-, und Z-Werte erstellen
X = Auswertung['\u0394\u03B2 [°]'].values.reshape(13, 13)
Y = Auswertung['\u0394\u03B3 [°]'].values.reshape(13, 13)
Z = Auswertung['k\u03B2 [-]'].values.reshape(13, 13)

# Contour-Plot erstellen
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 8))
z_min = np.floor(np.min(Z) / 0.5) * 0.5
z_max = np.ceil(np.max(Z) / 0.5) * 0.5
levels = np.arange(z_min, z_max, 0.5)
cs = ax.contour(X, Y, Z, levels=levels, colors='k', linestyle='solid')
clabels = plt.clabel(cs, inline=True, fontsize=10)
plt.grid(True)

# Passe die Größe des Diagramms an
plt.subplots_adjust(left=0.1, bottom=0.1, right=0.95, top=0.95)

# Achsenbeschriftungen und Titel hinzufügen
ax.set_xlabel('Gierwinkel \u0394\u03B2 [°]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_ylabel('Nickwinkel \u0394\u03B3 [°]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_title('Gierwinkelkoeffizient k$_{\beta}$ [-]', fontsize=18,
            fontweight='bold')

# Speichere das Diagramm als SVG-Datei ab
plt.savefig(Dateiname+'/Gierwinkelkoeffizient_'+Dateiname+'.svg', format='svg')

##### Nickwinkelkoeffizient #####

# X-, Y-, und Z-Werte erstellen
X = Auswertung['\u0394\u03B2 [°]'].values.reshape(13, 13)
Y = Auswertung['\u0394\u03B3 [°]'].values.reshape(13, 13)

```

```

Z = Auswertung['k\u03B3 [-]'].values.reshape(13, 13)

# Contour-Plot erstellen
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 8))
z_min = np.floor(np.min(Z) / 0.5) * 0.5
z_max = np.ceil(np.max(Z) / 0.5) * 0.5
levels = np.arange(z_min, z_max, 0.5)
cs = ax.contour(X, Y, Z, levels=levels, colors='k', linestyle='solid')
clabels = plt.clabel(cs, inline=True, fontsize=10)
plt.grid(True)

# Passe die Größe des Diagramms an
plt.subplots_adjust(left=0.1, bottom=0.1, right=0.95, top=0.95)

# Achsenbeschriftungen und Titel hinzufügen
ax.set_xlabel('Gierwinkel \u0394 [\u00b0]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_ylabel('Nickwinkel \u0393 [\u00b0]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_title('Nickwinkelkoeffizient k$_{\gamma}$ [-]', fontsize=18,
             fontweight='bold')

# Speichere das Diagramm als SVG-Datei ab
plt.savefig(Dateiname+'/Nickwinkelkoeffizient_'+Dateiname+'.svg',format='svg')

##### statischer Druckkoeffizient #####

# X-, Y-, und Z-Werte erstellen
X = Auswertung['\u0394 [\u00b0]'].values.reshape(13, 13)
Y = Auswertung['\u0393 [\u00b0]'].values.reshape(13, 13)
Z = Auswertung['ks [-]'].values.reshape(13, 13)

# Contour-Plot erstellen
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 8))
z_min = np.floor(np.min(Z) / 0.1) * 0.1
z_max = np.ceil(np.max(Z) / 0.1) * 0.1
levels = np.arange(z_min, z_max, 0.1)
cs = ax.contour(X, Y, Z, levels=levels, colors='k', linestyle='solid')
clabels = plt.clabel(cs, inline=True, fontsize=10)
plt.grid(True)

# Passe die Größe des Diagramms an
plt.subplots_adjust(left=0.1, bottom=0.1, right=0.95, top=0.95)

# Achsenbeschriftungen und Titel hinzufügen
ax.set_xlabel('Gierwinkel \u0394 [\u00b0]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_ylabel('Nickwinkel \u0393 [\u00b0]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_title('statischer Druckkoeffizient k$_s$ [-]', fontsize=18,
             fontweight='bold')

# Speichere das Diagramm als SVG-Datei ab
plt.savefig(Dateiname+'/statischer_Druckkoeffizient_'+Dateiname+'.svg',
           format='svg')

##### Totaldruckkoeffizient #####

# X-, Y-, und Z-Werte erstellen
X = Auswertung['\u0394 [\u00b0]'].values.reshape(13, 13)
Y = Auswertung['\u0393 [\u00b0]'].values.reshape(13, 13)
Z = Auswertung['kt [-]'].values.reshape(13, 13)

```

```
# Contour-Plot erstellen
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 8))
z_min = np.floor(np.min(Z) / 0.2) * 0.2
z_max = np.ceil(np.max(Z) / 0.2) * 0.2 + 0.2
levels = np.arange(z_min, z_max, 0.2)
cs = ax.contour(X, Y, Z, levels=levels, colors='k', linestyle='solid')
clabels = plt.clabel(cs, inline=True, fontsize=10)
plt.grid(True)

# Passe die Größe des Diagramms an
plt.subplots_adjust(left=0.1, bottom=0.1, right=0.95, top=0.95)

# Achsenbeschriftungen und Titel hinzufügen
ax.set_xlabel('Gierwinkel \u0039\u003B2 [\u00b0]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_ylabel('Nickwinkel \u0039\u003B3 [\u00b0]', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_title('Totaldruckkoeffizient k$_t$ [-]', fontsize=18, fontweight='bold')

# Speichere das Diagramm als SVG-Datei ab
plt.savefig(Dateiname+'/Totaldruckkoeffizient_'+Dateiname+'.svg', format='svg')
```

B. Datenblätter

END COVER COLOR: BLACK

4-PIN GX16 FEMALE PLUG 15-PIN DB MALE PLUG

AWG22#(*4)
HEAT-SHRINK TUBE
AWG26#(*6)
1000CPR

TYPE OF CONNECTION (EXTERN)		MOTOR	
PIN NO	BIPOLAR	LEADS	WINDING
1	A+ -		A+
2	A- -		A-
3	B+ -		B+
4	B- -		B-

FULL STEP 2 PHASE-EX., WHEN FACING MOUNTING END (X)

STEP	A+	B+	A-	B-	CCW	CW
1	+	+	-	-	↩	↪
2	-	+	+	-	↪	↩
3	-	-	+	+	↩	↪
4	+	-	-	+	↪	↩

ENCODER RESOLUTION: 1000PPR(4000CPR)

15-PIN DB MALE PLUG DESCRIPTION	EA+	VCC	GND	EB+	EB-	EA-
1	1	2	3	11	12	13

SPECIFICATION		CONNECTION	
AMPS/PHASE	BIPOLAR	BIPOLAR	
RESISTANCE/PHASE(Ohms)@20°C	2.00	2.00	
INDUCTANCE/PHASE(mH)@1KHz	1.75±10%	1.75±10%	
HOLDING TORQUE(Nm)[lb-in]	4.00±20%	4.00±20%	
STEP ANGLE(°)	0.72 [6.36]	0.72 [6.36]	
MAXIMUM RADIAL RUNOUT(mm)@LOAD 450g	1.8±0.09	1.8±0.09	
MAXIMUM AXIAL RUNOUT(mm)@LOAD 920g	0.025	0.025	
ROTOR INERTIA(g-cm ²)	0.075	0.075	
WEIGHT(Kg)[lb]	110	110	
TEMPERATURE RISE:MAX.80°C (MOTOR STANDSTILL; FOR 2PHASE ENERGIZED)	-	-	
OPERATION AMBIENT TEMPERATURE 0°C-50°C[32°F-122°F]	-	-	
INSULATION RESISTANCE 100 Mohm (UNDER NORMAL TEMPERATURE AND HUMIDITY)	-	-	
INSULATION CLASS B 130°C[266°F]	-	-	
DIELECTRIC STRENGTH 500VAC FOR 1MIN.(BETWEEN THE MOTOR COILS AND THE MOTOR CASE)	-	-	

APVD 10.16.2021

CHKD

DRN 1:1

SIGNATURE DATE

STEPPERONLINE®

STEPPER MOTOR

17E1K-07

100W Power Supply S-100-24

Features:

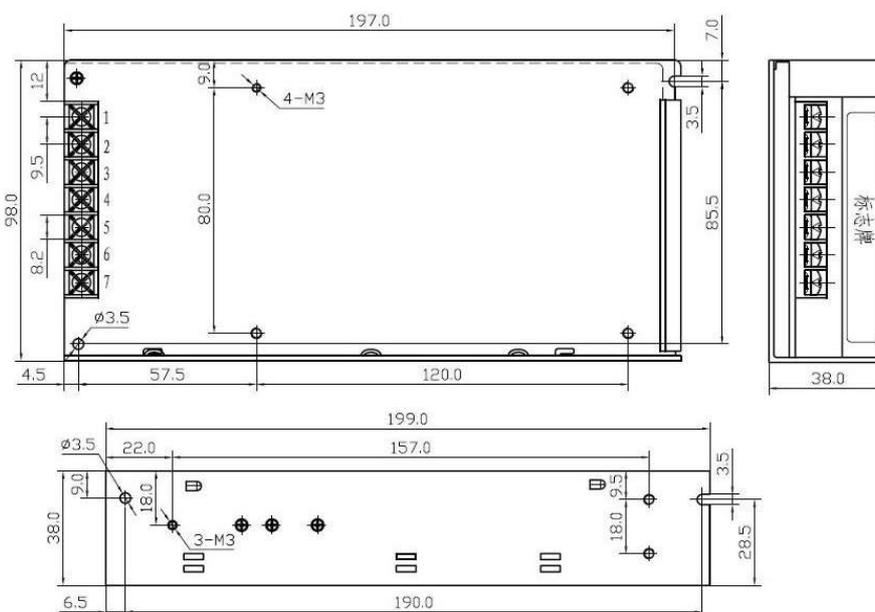
- 24V DC 4.5A output
- AC input voltage range: 92~132V/175~264VAC
- 115V/230V AC selected by switch
- High efficiency low cost
- Free air cooling convection
- Low output ripple and yawp
- Over current, over voltage, short circuit and overheat protections
- 199*97*38mm (L*W*H)



General Specification:

Model	S-100-24
DC Output	24V 4.5A
Wave and Noise	70mVp-p
Inlet Stability	±0.2%
Load Stability	±0.2%
Efficiency	84%
Adjustable range for DC Voltage	21V~26V
AC Input Voltage	92~132V/175~264VAC Slected by Switch
AC Input Current	1.08A/115VAC 0.53A/230VAC
Working Temperature	-10~50°C
Safety Standards	GB4943, UL60950, EN60950
EMC Standards	GB9254, 55022, Class A
Weight	0.55kg

Dimensions:



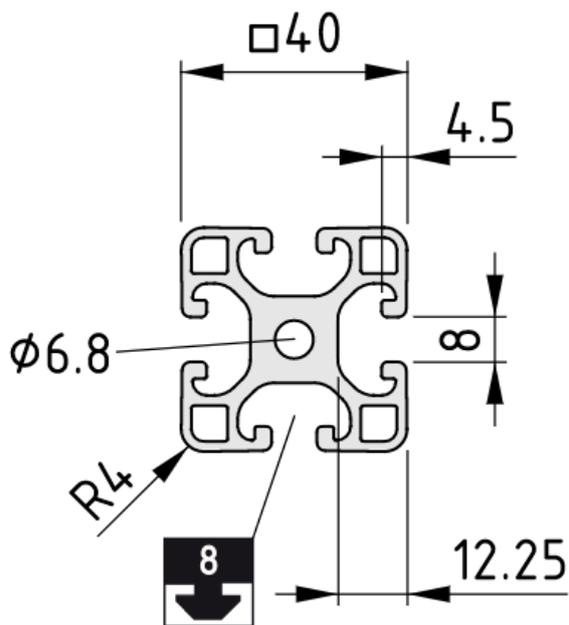
StepperOnline Co.,Ltd / Sales@stepperonline.com / www.omc-stepperonline.com

Eigenschaften

Baureihe Baureihe 8	Eigenschaft natur	ESD ESD-sicher = Ja	Fläche A = 6.46 cm²
Flächenträgheitsmoment Torsion I_t = 1.36 cm⁴	Flächenträgheitsmoment um x-Achse I_x = 9 cm⁴	Flächenträgheitsmoment um y-Achse I_y = 9 cm⁴	Gewicht spez. Länge [kg/m] m = 1.74 kg/m
Liefereinheit Zuschnitt max. 6000 mm	Material Al, eloxiert	Widerstandsmoment um x-Achse W_x = 4.5 cm³	Widerstandsmoment um y-Achse W_y = 4.5 cm³



Details



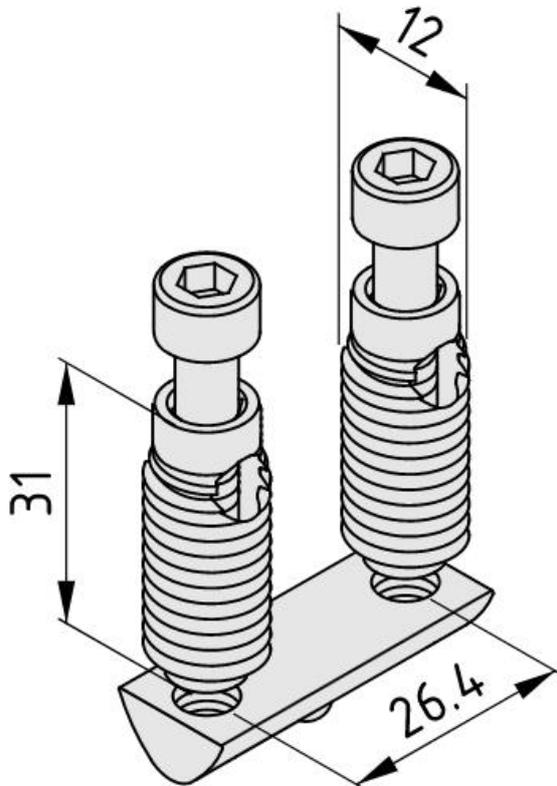
Eigenschaften

2 Automatikverbinder 8, St, verzinkt
 2 Zylinderschrauben DIN 912-M6x40, St, verzinkt
 Nutenstein 8 St 2xM6-36, verzinkt

Baureihe Baureihe 8	ESD ESD-sicher = Ja	Gewicht [g] m = 60.4 g	Liefereinheit 1 Satz
Moment M = 14 Nm			



Details

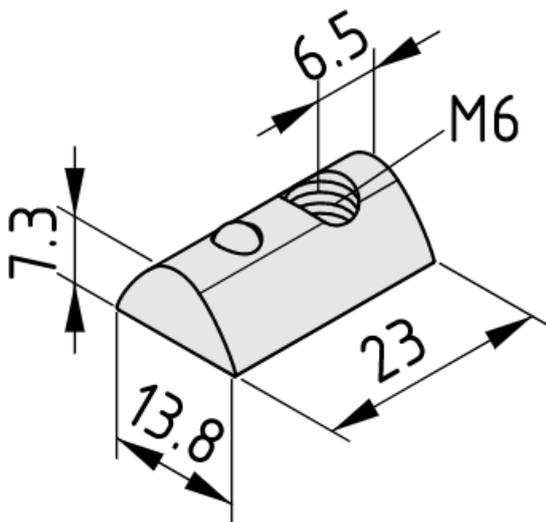


Eigenschaften

Baureihe Baureihe 8	Eigenschaft rostfrei	ESD ESD-sicher = Ja	Gewindedurchmesser M6
Gewicht [g] m = 10 g	Kraft max. F_{max.} = 2800 N	Liefereinheit 1 Stück	Material St
Moment M = 11 Nm			



Details





61807-2RS1

Rillenkugellager mit Dichtungen oder Deckscheiben

Einreihige Rillenkugellager mit Dichtungen oder Deckscheiben sind besonders vielseitig einsetzbar, arbeiten reibungsarm, sind für einen niedrigen Geräusch- und Schwingungspegel optimiert und dadurch für hohe Drehzahlen geeignet. Sie nehmen Radial-Axial-Kombibelastungen in beiden Richtungen auf, lassen sich einfach montieren und sind weniger wartungsintensiv als viele andere Lagerarten. Die integrierte Dichtung kann die Lagergebrauchsdauer wesentlich verlängern, da sie den Schmierstoff im Lager hält und Verunreinigungen abweist.

- Integrierte Dichtung verlängert die Lagerlebensdauer
- Einfache, vielseitige und robuste Konstruktion
- Reibungsarm und hohe Nenndrehzahlen
- Aufnahme von Radial-Axial-Kombibelastungen in beiden Richtungen
- Sehr geringer Wartungsaufwand

Overview

Abmessungen

Bohrungsdurchmesser	35 mm
Außendurchmesser	47 mm
Breite	7 mm

Leistung

Dynamische Tragzahl	4.36 kN
Statische Tragzahl	3.35 kN
Grenzdrehzahl	8 500 r/min

Eigenschaften

Einfüllnuten	Ohne
Anzahl der Reihen	1
Befestigungsfunktion, Lageraußenring	Kein(e/r)
Bohrungstyp	Zylindrisch
Käfig	Blech
Passungsanordnung	Kein(e)
Radiale Lagerluft	CN
Werkstoff, Lager	Wälzlagerstahl
Beschichtung	Ohne
Dichtung	Dichtung an beiden Seiten
Art der Abdichtung	Kontakt
Schmierstoff	Fett

Werkstoff: iglidur® I3

Allgemeine Eigenschaften: ³⁾

Dichte:	1,05 g/cm ³
Farbe:	gelb
maximale Feuchtigkeitsaufnahme bei 23°C und 50%r.F.:	0,8 Gew.-%
maximale Wasseraufnahme:	1,9 Gew.-%

Mechanische Eigenschaften: ³⁾

Biege-E-Modul:	1400 MPa
Biegefestigkeit:	68 / 61 MPa ⁴⁾
Zug-E-Modul:	1800 MPa
Zugfestigkeit:	41 / 36 MPa ⁴⁾
maximale Flächenpressung:	46 MPa
Härte Shore D:	70

Thermische Eigenschaften

obere langzeitige Anwendungstemperatur ¹⁾ :	80 °C
obere kurzzeitige Anwendungstemperatur ^{1), 2)} :	140 °C
obere kurzzeitige Umgebungstemperatur ^{1), 2)} :	150 °C
untere Anwendungstemperatur:	-40°C

Elektrische Eigenschaften: ³⁾

spezifischer Durchgangswiderstand:	>10 ¹² Ωcm
Oberflächenwiderstand:	>10 ¹¹ Ω

¹⁾ Relaxation nicht ausgeschlossen

²⁾ ohne Zusatzlast; keine Gleitbewegung

³⁾ Abhängig von den Druckparametern und Baurichtung

⁴⁾ Flach/Aufrecht gesintert

Die Angaben auf diesem Werkstoffdatenblatt beruhen auf dem derzeitigen Stand unserer Kenntnisse über den beschriebenen Werkstoff. Sie stellen keine Zusicherung bestimmter Formteil-Eigenschaften dar.

Erstellt: 23.11.2015 / Dr. Ralf Setzer / Entwicklung
Geändert: 02.02.2017 / Dr. Ralf Setzer / Entwicklung
Verteiler: Technisches Marketing Energieketten und Gleitlager,
Entwicklung Energieketten und Gleitlager

I:\QS\Qmdok\Formular\Allgemein\Entwicklung\F-2-0105 Vorlage Werkstoffdatenblatt.dot

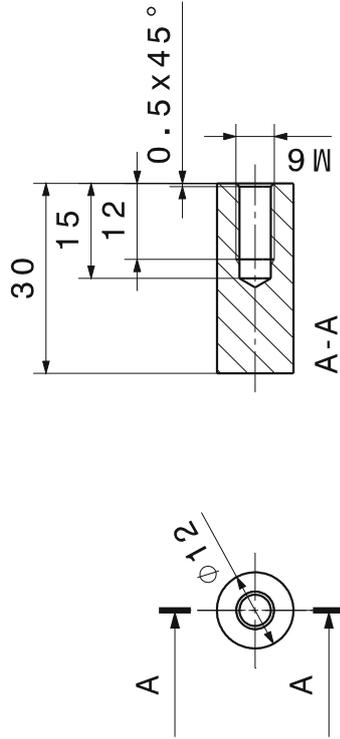
QS-Nr.: F-2-0105-C

Seite 1 von 1

C. Zeichnungsableitungen

<p>Ra 3,2</p>	<p>Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne Einverständnis nicht an Dritte weitergegeben oder reproduziert werden.</p> <p>Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - fH</p>	<p>Technische Universität Wien</p>	
		<p>Bezeichnung Gummipuffer</p>	
<p>Gezeichnet D. Vejnaska</p> <p>Telefonnummer 0650/8534963</p>	<p>Datum 05.07.2022</p> <p>Stück 2</p>	<p>Format A4</p> <p>Zeichnungs Nr. 001</p> <p>Material Polyethylen</p>	<p>Blatt 1/1</p>
		<p>Maßstab 1:1</p>	<p>Masse: 0,00724kg</p>

Ra 3,2



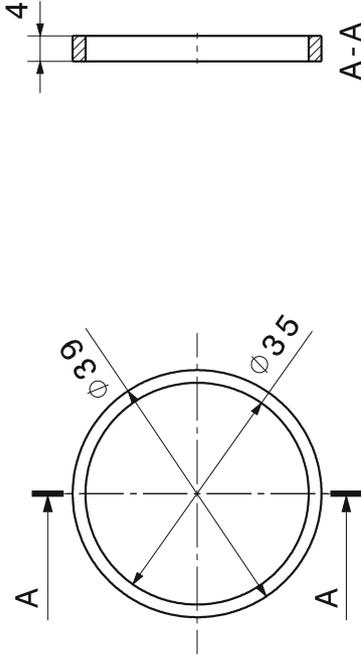
Technische Universität Wien

Bezeichnung

Stopper

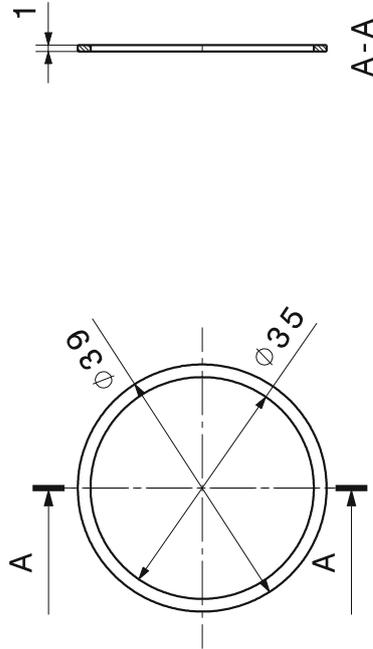
Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne Einverständnis nicht an Dritte weitergegeben oder reproduziert werden. Allgemeintoleranzen		DIN ISO 2768 - fH	
Gezeichnet	Datum	Zeichnungs Nr.	Material
D. Vejnaska	05.07.2022	002	Aluminium
Telefonnummer	Stück	Maßstab 1:1	Masse: 0,00839kg
0650/8534963	2		Blatt 1/1

Ra 3,2



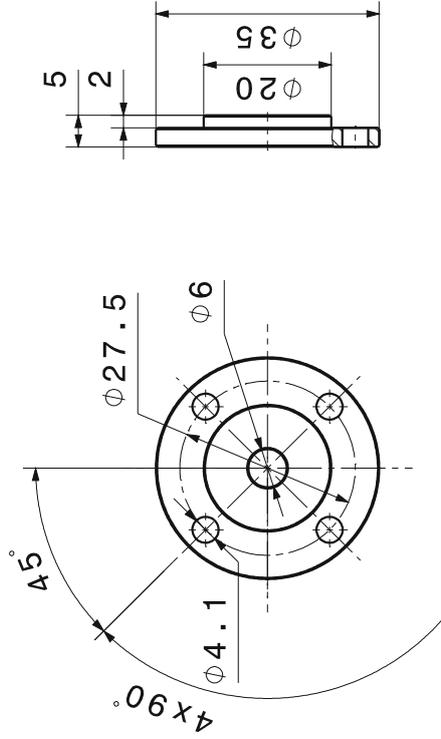
Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne Einverständnis nicht an Dritte weitergegeben oder reproduziert werden. Allgemeine Toleranzen DIN ISO 2768 - fH		Technische Universität Wien 	
Bezeichnung Distanzscheibe_4mm		Bezeichnung	
Gezeichnet D. Vejnaska	Datum 05.07.2022	Zeichnungs Nr. 003	Material Aluminium
Telefonnummer 0650/8534963	Stück 2	Maßstab 1:1	Masse: 0,00252kg Blatt 1/1

Ra 3,2



Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne Einverständnis nicht an Dritte weitergegeben oder reproduziert werden. Allgemeintoleranzen		DIN ISO 2768 - fH		Datum 05.07.2022		Stück 1	
Gezeichnet D. Vejnaska		Datum 05.07.2022		Zeichnungs Nr. 004		Material Aluminium	
Telefonnummer 0650/8534963		Stück 1		Maßstab 1:1 Masse: 0,00063kg		Blatt 1/1	
Technische Universität Wien				Bezeichnung Distanzscheibe_1mm			
							

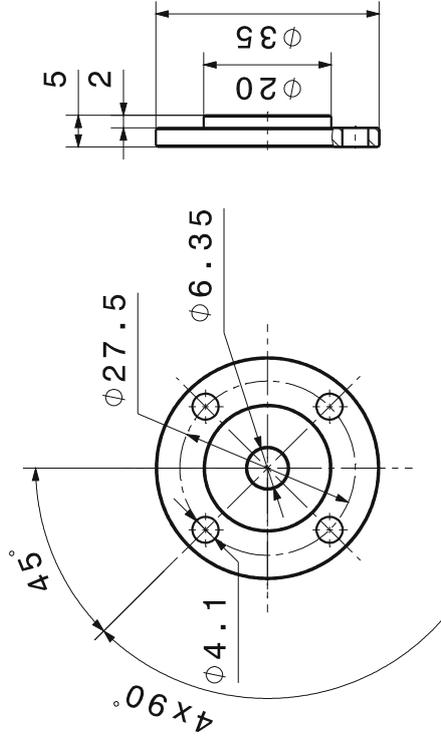
Ra 3,2



Alle nicht bemaßten Fasen 0.2x45°

Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne Einverständnis nicht an Dritte weitergegeben oder reproduziert werden. Allgemeintoleranzen		DIN ISO 2768 - fH		Datum 05.07.2022		Stück 1	
Gezeichnet D. Vejnosa		Telefonnummer 0650/8534963		Format A4		Zeichnungs Nr. 005	
Allgemeintoleranzen		Material Aluminium		Bezeichnung Vollmond_D6		Blatt 1/1	
Technische Universität Wien		Masse: 0,00869kg		TU WIEN			

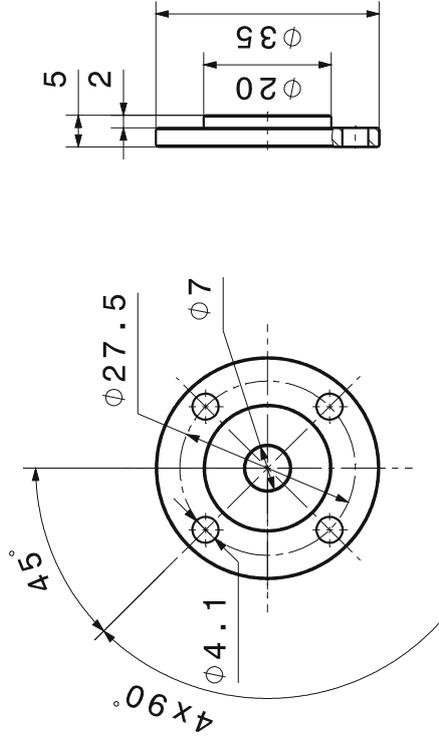
Ra 3,2



Alle nicht bemaßten Fasen 0.2x45°

Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne Einverständnis nicht an Dritte weitergegeben oder reproduziert werden. Allgemeintoleranzen		DIN ISO 2768 - fH		Datum 05.07.2022		Stück 1	
Gezeichnet D. Vejnaska		Datum 05.07.2022		Stück 1		Telefonnummer 0650/8534963	
Bezeichnung Vollmond_D6,35				Material Aluminium		Blatt 1/1	
Technische Universität Wien		Zeichnungs Nr. 006		Masse: 0,00865kg		Blatt 1/1	
TU WIEN		Format A4		Maßstab 1:1			

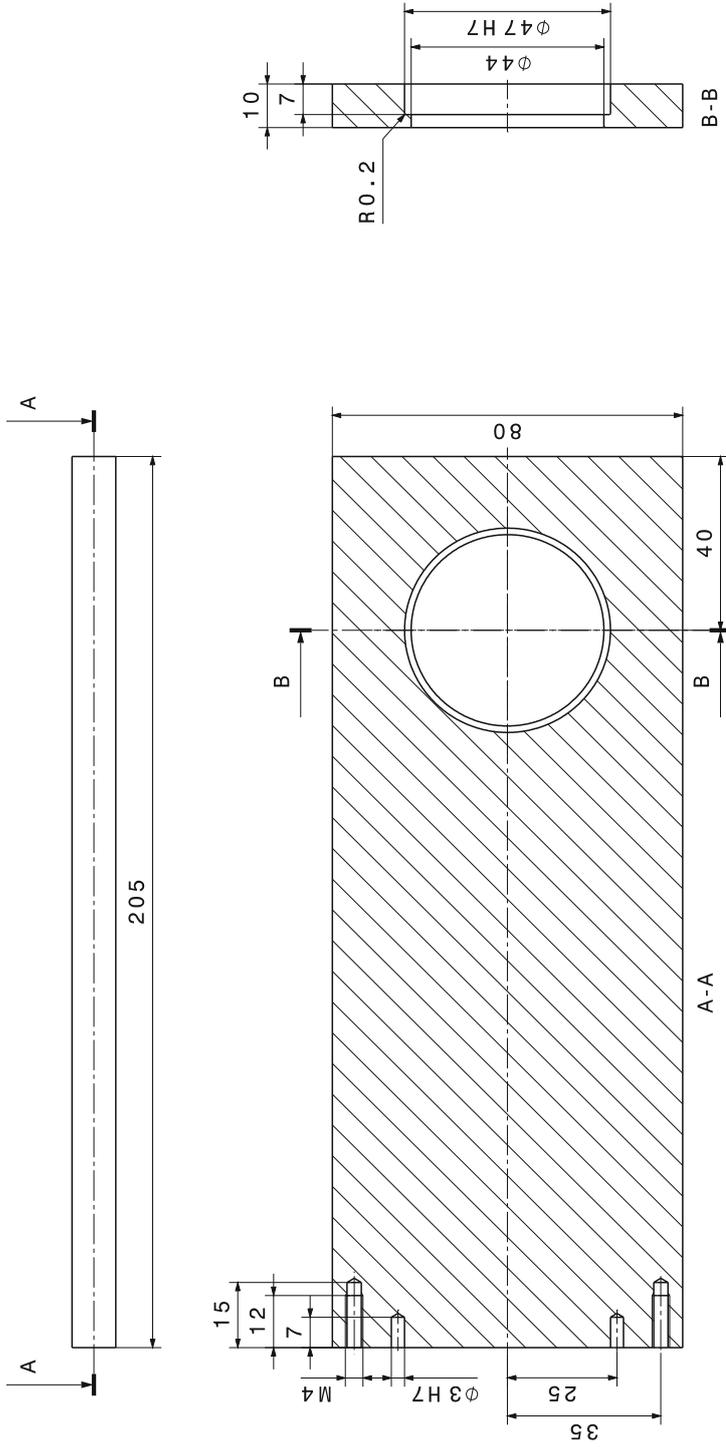
Ra 3,2



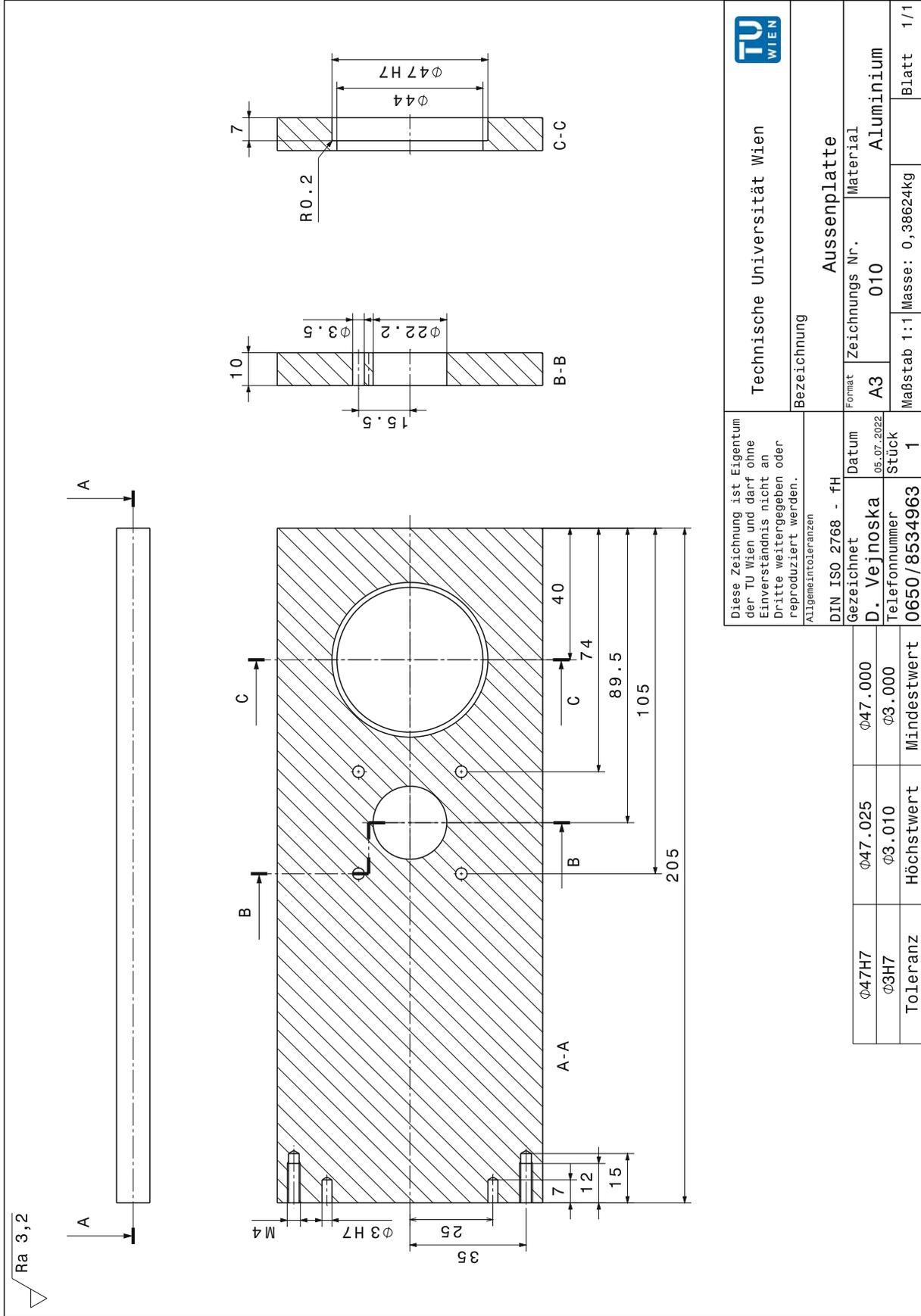
Alle nicht bemaßten Fasen 0.2x45°

Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne Einverständnis nicht an Dritte weitergegeben oder reproduziert werden. Allgemeintoleranzen		DIN ISO 2768 - fH		Datum 05.07.2022		Stück 1	
Gezeichnet D. Vejnaska		Telefonnummer 0650/8534963		Material Aluminium		Blatt 1/1	
Bezeichnung Vollmond_D7		Zeichnungs Nr. 007		Masse: 0,00856kg		Maßstab 1:1	
Technische Universität Wien		Format A4		Masse: 0,00856kg		Blatt 1/1	
TU WIEN		Zeichnungs Nr. 007		Material Aluminium		Blatt 1/1	

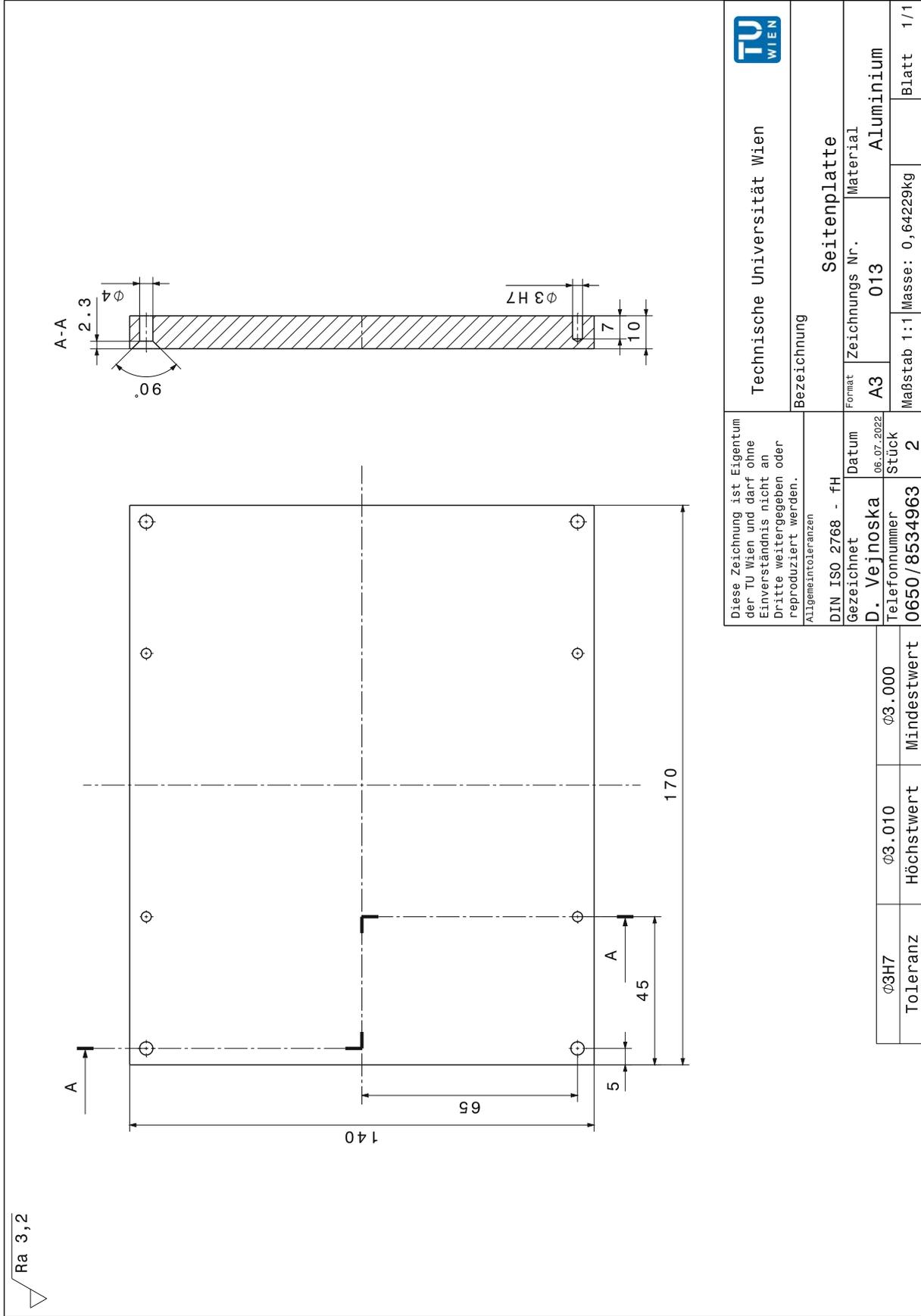
Ra 3,2



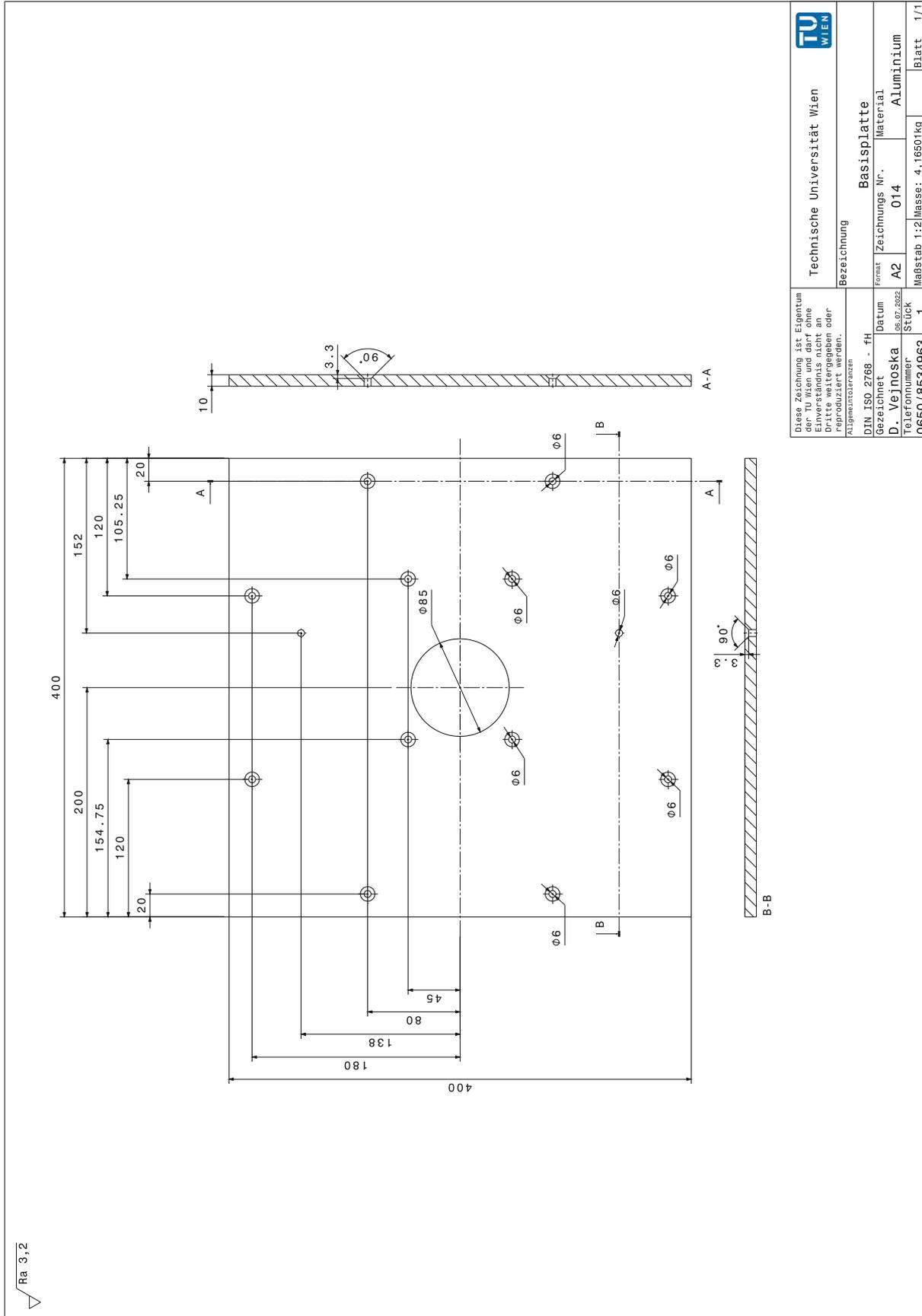
<p>Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne Einverständnis nicht an Dritte weitergegeben oder reproduziert werden. Allgemeintoleranzen</p>		<p>Technische Universität Wien</p>			
<p>DIN ISO 2768 - fh</p>		<p>Innenplatte</p>		<p>Bezeichnung</p>	
<p>Gezeichnet</p>	<p>Datum</p>	<p>Format</p>	<p>Zeichnungs Nr.</p>	<p>Material</p>	<p>Blatt</p>
<p>D. Vejniska</p>	<p>05.07.2022</p>	<p>A3</p>	<p>009</p>	<p>Aluminium</p>	<p>1/1</p>
<p>Telefonnummer</p>	<p>Stück</p>	<p>Maßstab 1:1</p>	<p>Masse: 0,3977kg</p>	<p></p>	<p></p>
<p>0650/8534963</p>	<p>1</p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>
<p>$\varnothing 47\text{ H7}$</p>	<p>$\varnothing 47.000$</p>	<p>$\varnothing 47.025$</p>	<p>Höchstwert</p>	<p>Mindestwert</p>	<p></p>
<p>$\varnothing 3\text{ H7}$</p>	<p>$\varnothing 3.000$</p>	<p>$\varnothing 3.010$</p>	<p>Höchstwert</p>	<p>Mindestwert</p>	<p></p>
<p>Toleranz</p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>



Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne Einverständnis nicht an Dritte weitergegeben oder reproduziert werden. Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - fH	Technische Universität Wien 	
	Aussenplatte	
Gezeichnet D. Vejniska	Zeichnungs Nr. 010	Material Aluminium
Datum 05.07.2022	Format A3	Maßstab 1:1 Masse: 0,38624kg
Telefonnummer 0650/8534963	Stück 1	Blatt 1/1



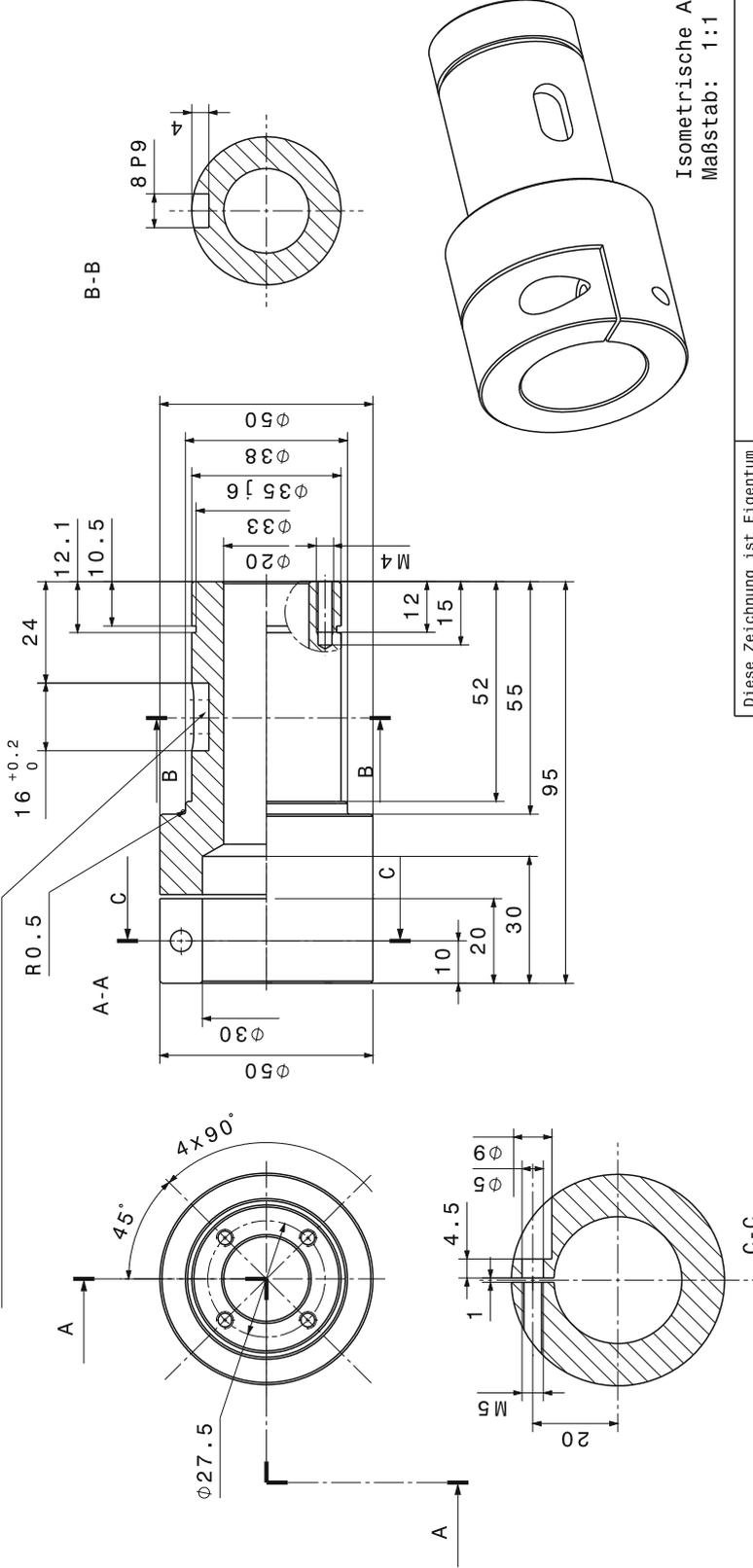
Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne Einverständnis nicht an Dritte weitergegeben oder reproduziert werden. Allgemeintoleranzen		Technische Universität Wien 	
DIN ISO 2768 - fh		Bezeichnung Seitenplatte	
Gezeichnet D. Vejniska	Datum 06.07.2022	Format A3	Zeichnungs Nr. 013
Telefonnummer 0650/8534963	Stück 2	Material Aluminium	
Toleranz Höchstwert 03.010 Mindestwert 03.000	Maßstab 1:1 Masse: 0,64229kg Blatt 1/1		



Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne schriftliche Genehmigung der TU Wien weitergegeben oder reproduziert werden. Allgemeinbestimmungen		Technische Universität Wien		TU WIEN
DIN ISO 2768 - FH		Bezeichnung		
Gezeichnet	Datum	Format	Basisplatte	
D. Vejniska	06.07.2022	A2	Zeichnungs Nr.	Material
Telefonnummer	Stück	Maßstab 1:2		ALuminium
0650/8534963	1	Masse: 4,1650/kg		Blatt 1/1

Ra 3,2

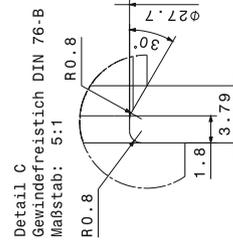
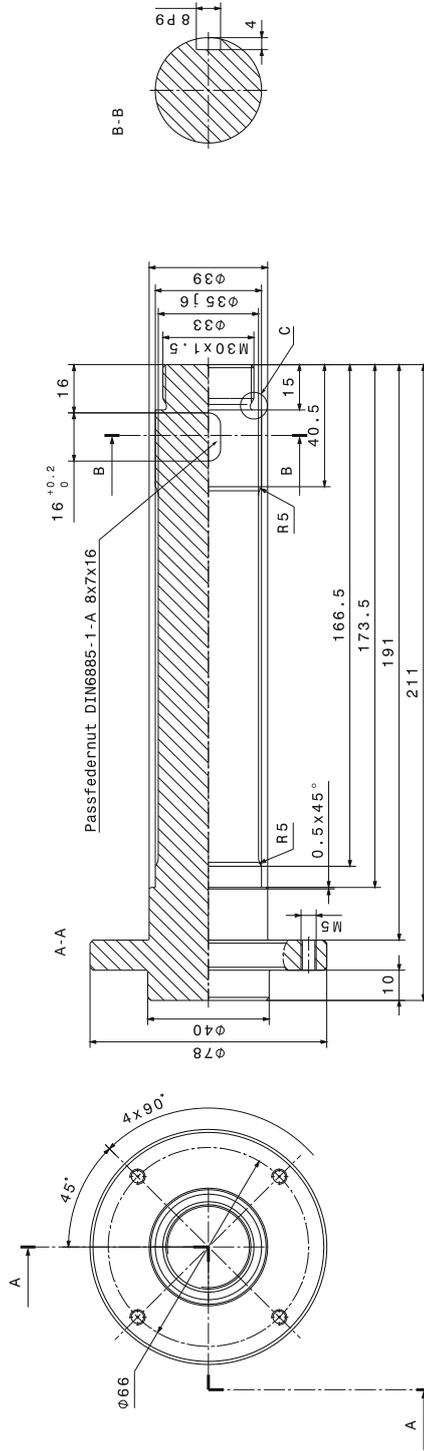
Passfedernut DIN6885-1-A 8x7x16



Isometrische Ansicht
Maßstab: 1:1

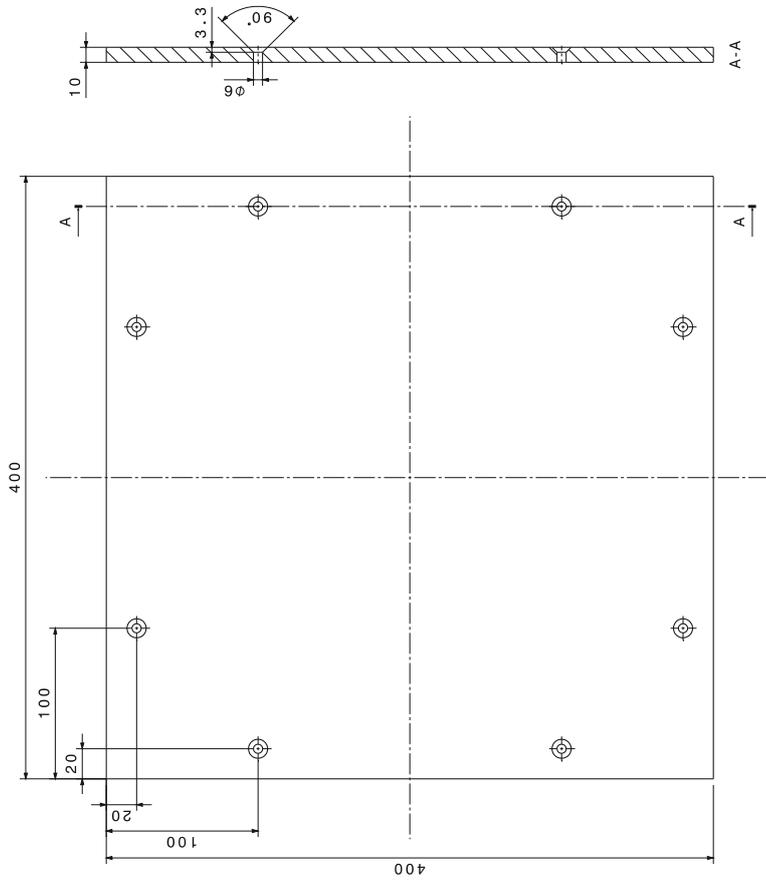
Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne Einverständnis nicht an Dritte weitergegeben oder reproduziert werden. Allgemeintoleranzen		Technische Universität Wien		TU WIEN	
DIN ISO 2768 - fh		Bezeichnung			
Gezeichnet		Welle oben			
Datum		Zeichnungs Nr.		Material	
D. Vejniska		A3		015 Aluminium	
Telefonnummer		Maßstab 1:1		Masse: 0,18736kg	
0650/8534963		1		Blatt 1/1	
Alle nicht bemaßten Fasen 0.5x45°					
8P9	7.985	7.949			
Ø35j6	Ø35.011	Ø34.995			
Toleranz	Höchstwert	Mindestwert			

Ra 3,2



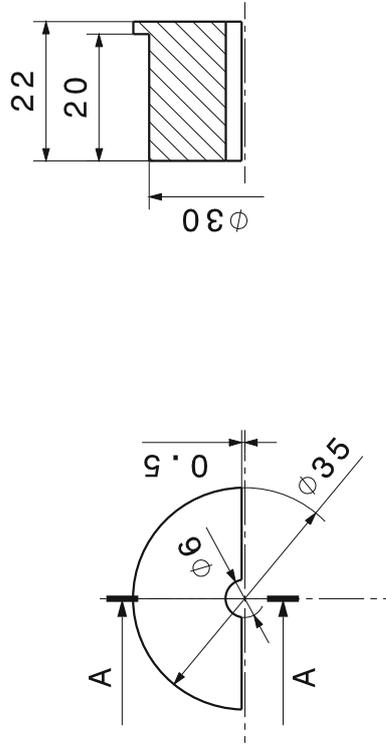
Alle nicht bemaßten Fasen 1x45°

Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne schriftliche Genehmigung der TU Wien weitergegeben oder reproduziert werden. Allgemeinbestimmungen		DIN ISO 2768 - fH		Welle unten	
Gezeichnet	Datum	Format	Zeichnungs Nr.	Material	
D. Vejniska	07.07.2022	A2	016	ALUMINIUM	
Telefonnummer	Stück	Maßstab 1:1		Masse: 0,6219kg	
0650/8534963	1			Blatt 1/1	
8P9	7.985	7.949			
03516	035.011	034.995			
Toleranz	Höchstwert	Mindestwert			



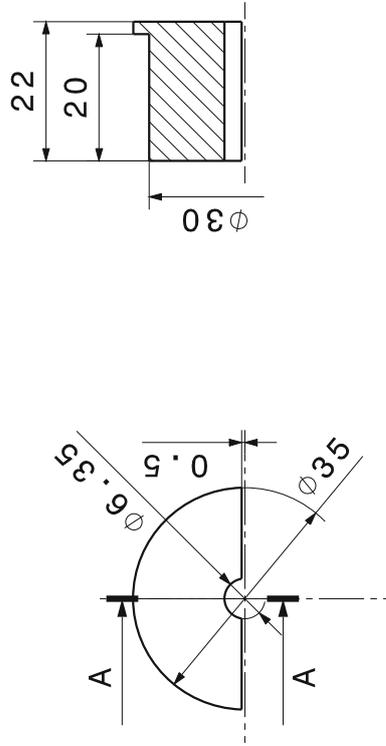
Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne schriftliche Genehmigung der TU Wien nicht weitergegeben oder reproduziert werden. Allgemeinbestimmungen		Technische Universität Wien		TU WIEN
DIN ISO 2768 - fH		Bezeichnung		
Gezeichnet	Datum	Format	Controllerplatte	
D. Vejniska	05.10.2022	A2	Zeichnungs Nr.	Material
Telefonnummer	Stück	017		Kunststoff
0650/8534963	1	Maßstab 1:2		Masse: 1,91539kg
				Blatt 1/1

Ra 3,2



Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne Einverständnis nicht an Dritte weitergegeben oder reproduziert werden. Allgemeine Toleranzen		Technische Universität Wien 	
DIN ISO 2768 - fH		Bezeichnung Klemmstück D6	
Gezeichnet D. Vejnaska	Datum 05.07.2022	Zeichnungs Nr. 018	Material Polyethylen
Telefonnummer 0650/8534963	Stück 2	Maßstab 1:1 Masse: 0,00894kg	Blatt 1/1

Ra 3,2



Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne Einverständnis nicht an Dritte weitergegeben oder reproduziert werden.
Allgemeintoleranzen
DIN ISO 2768 - fH

Technische Universität Wien 

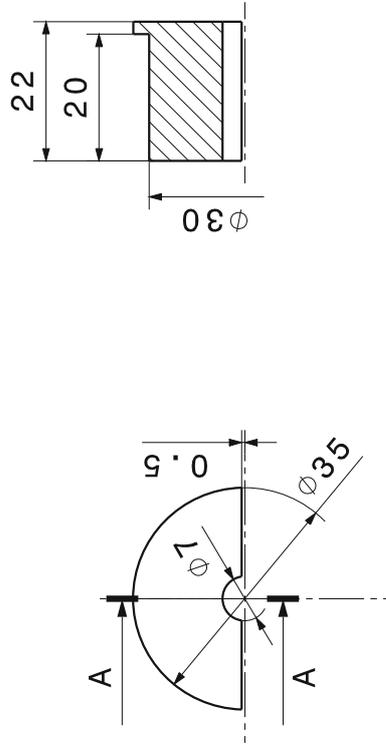
Bezeichnung

Klemmstück D6,35

Gezeichnet	Datum
D. Vejnaska	05.07.2022
Telefonnummer	Stück
0650/8534963	2

Format	Zeichnungs Nr.	Material
A4	019	Polyethylen
Maßstab 1:1	Masse: 0,00894kg	Blatt 1/1

Ra 3,2



Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne Einverständnis nicht an Dritte weitergegeben oder reproduziert werden.
Allgemeintoleranzen
DIN ISO 2768 - fH

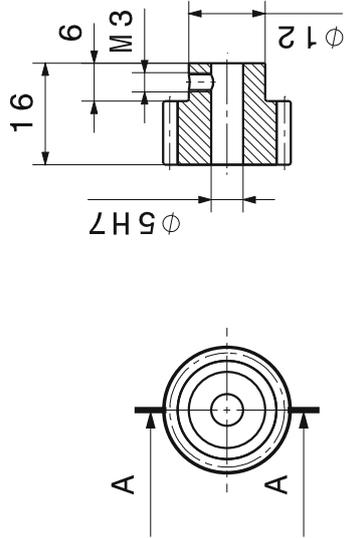
Technische Universität Wien 

Bezeichnung

Klemmstück D7

Gezeichnet	Datum	Material	Blatt	1/1
D. Vejnaska	05.07.2022	Polyethylen		
Telefonnummer	Stück	Maßstab 1:1	Masse: 0,00894kg	
0650/8534963	2			

Ra 4,75



Modul	1mm	Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne Einverständnis nicht an Dritte weitergegeben oder reproduziert werden.		ϕ5H7	ϕ5.012	ϕ5.000
Zähnezahl	18	Allgemeintoleranzen		Toleranz		
Fußkreisdurchmesser	15,5mm	DIN ISO 2768 - fH		Höchstwert		
Wälzkreisdurchmesser	18mm	Gezeichnet		Mindestwert		
Kopfkreisdurchmesser	20mm	D. Vejnoka		Technische Universität Wien		
Schrägungswinkel	0°	Telefonnummer		Bezeichnung		
Breite	10mm	0650/8534963		Ritzel		
Achsabstand	49,5mm	Datum		Format		
		05.07.2022		Zeichnungs Nr.		
		Stück		Material		
		2		A4		
		021		igludur i3-PL		
		Masse: 0,00299kg		Maßstab 1:1		
		Blatt 1/1				

		<table border="1"> <tr> <td>8P9</td> <td>7.985</td> <td>7.949</td> </tr> <tr> <td>Ø35H7</td> <td>Ø35.025</td> <td>Ø35.000</td> </tr> <tr> <td>Toleranz</td> <td>Höchstwert</td> <td>Mindestwert</td> </tr> </table>	8P9	7.985	7.949	Ø35H7	Ø35.025	Ø35.000	Toleranz	Höchstwert	Mindestwert
8P9	7.985	7.949									
Ø35H7	Ø35.025	Ø35.000									
Toleranz	Höchstwert	Mindestwert									
<p>Modul 1mm</p> <p>Zähnezahl 81</p> <p>Fußkreisdurchmesser 78,5mm</p> <p>Wälzkreisdurchmesser 81mm</p> <p>Kopfkreisdurchmesser 83mm</p> <p>Schrägungswinkel 0°</p> <p>Breite 8mm</p> <p>Achsabstand 49,5mm</p>		<p>Technische Universität Wien</p> <p>Bezeichnung Zahnrad</p>									
<p>Diese Zeichnung ist Eigentum der TU Wien und darf ohne Einverständnis nicht an Dritte weitergegeben oder reproduziert werden.</p> <p>Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - fH</p>		<p>Format A4</p> <p>Zeichnungs Nr. 022</p> <p>Material iglidur i3-PL</p> <p>Maßstab 1:1</p> <p>Masse: 0,04148kg</p> <p>Blatt 1/1</p>									
<p>Gezeichnet D. Vejnoka</p> <p>Datum 05.07.2022</p> <p>Stück 2</p> <p>Telefonnummer 0650/8534963</p>		<p>Bezeichnung Zahnrad</p>									